

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS WILLIAM DE ALMEIDA REZENDE

ESTUDO DO IMPACTO DURANTE O POUSO DE AERONAVES  
MODERNAS PESADAS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DE  
PISTAS DE AEROPORTOS

CURITIBA

2018

CARLOS WILLIAM DE ALMEIDA REZENDE

ESTUDO DO IMPACTO DURANTE O POUSO DE AERONAVES  
MODERNAS PESADAS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DE  
PISTAS DE AEROPORTOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientadora: Professora Doutora Daniane Franciesca Vicentini.

CURITIBA

2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas,  
UFPR Biblioteca de Ciência e Tecnologia

R467e

Rezende, Carlos William de Almeida

Estudo do impacto durante o pouso de aeronaves modernas pesadas em pavimentos flexíveis de pistas de aeroportos / Carlos William de Almeida Rezende. – Curitiba, 2018.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2018.

Orientadora: Daniane Franciesca Vicentini.

1. Aeronaves. 2. Aeroportos. 3. Pavimentos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Vicentini, Daniane Franciesca. III. Título.

CDD: 387.7

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

## TERMO DE APROVAÇÃO

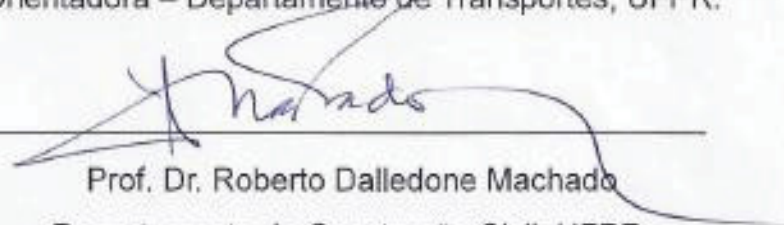
CARLOS WILLIAM DE ALMEIDA REZENDE

### ESTUDO DO IMPACTO DURANTE O POUSO DE AERONAVES MODERNAS PESADAS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DE PISTAS DE AEROPORTOS

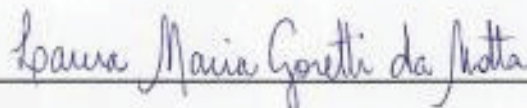
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração em Estruturas, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, aprovado pela seguinte banca examinadora:



Profa. Dra. Daniane Franciesca Vicentini  
Orientadora – Departamento de Transportes, UFPR.



Prof. Dr. Roberto Dalledone Machado  
Departamento de Construção Civil, UFPR.



Profa. Dra. Laura Maria Goretti da Motta  
Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ.



Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo  
Departamento de Construção Civil, UTFPR.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus.

Agradeço aos meus amados pais.

Ao meu irmão César Ulisses de Almeida Rezende, que representa o mesmo papel de um pai para mim.

À Professora Daniane Franciesca Vicentini pela orientação, pela gratificante oportunidade em compartilhar sua sabedoria, pela paciência, pela dedicação, pelo exemplo de pessoa e pela grande amizade.

Ao querido e admirável Professor Everaldo Pletz, que acima de tudo é um grande amigo e espelho para minha vida, e durante todo o processo de graduação e pós-graduação estive ao meu lado dando total apoio e incentivo.

Ao Professor Roberto Dalledone Machado pelo conhecimento transmitido, pelo apoio, pelos conselhos e pela amizade adquirida durante o mestrado.

Ao Professor Paulo Sérgio Bardella e à Professora Carolina Alves do Nascimento Alvim pelas indicações e apoio para realização do mestrado.

Aos meus colegas de mestrado Cladilson Nardino, Ana Paula Imai, Tatiane Zanoni e Vinícius Hanser de Souza pelas amizades e companheirismos nos momentos mais difíceis.

Ao Emílio Eiji Kavamura pelos auxílios durante o mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC/UFPR) pela acolhida.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR e ao Laboratório de Vibrações e Ruído por disponibilizar o *software* ANSYS.

E a todos que de alguma forma direta ou indireta fizeram parte deste processo.



## RESUMO

O transporte aéreo tem passado por grandes mudanças tecnológicas que impactam diretamente na infraestrutura aeroportuária. Uma delas é a utilização de aeronaves modernas pesadas (AMP), as quais afetam os pavimentos aeroportuários com maior intensidade, devido ao aumento de cargas e mudanças nas configurações dos trens de pousos. Este trabalho apresenta uma análise estática e dinâmica do contato pneu-pavimento por um modelo tridimensional em elementos finitos, usada para investigar o comportamento estrutural quanto às deflexões (deslocamentos verticais), tensões e deformações, de uma pista de aeroporto sob condições de pouso das AMP para as situações mais críticas (sem considerar, no entanto, a rigidez da aeronave e amortecimento do trem de pouso). Além das AMP, foram consideradas ainda o Airbus A340-600 e o Boeing 777-300, aeronaves genéricas comuns, para fins de comparação. Desenvolveu-se, em modelagem computacional elástico-linear, o pavimento aeroportuário como uma estrutura do tipo multicamadas e o pneu como uma única roda do trem de pouso principal da aeronave, também considerado com comportamento elástico-linear, cuja estrutura foi composta pela geometria real. Os resultados obtidos da análise dinâmica no instante do pouso foram comparados aos da análise estática. Observou-se que a aeronave que mais produz deflexão (deslocamento vertical), tensão e deformação ao pavimento aeroportuário, dentre as analisadas neste trabalho, foi o Airbus A340-600. Em contrapartida, as aeronaves que menos produzem deflexão, tensão e deformação ao pavimento aeroportuário foram o Airbus A380, maior avião comercial do mundo (na análise dinâmica), e o Boeing 747-8 (na análise estática).

Palavras-chave: Pouso de aeronave, coeficiente de impacto dinâmico, pavimento aeroportuário, elementos finitos.

## **ABSTRACT**

Air transport has undergone major technological changes that impact directly on airport infrastructure. One is the use of new large aircraft (NLA), which affects the airports pavements with greater intensity, due to the increase of loads and changes in the configurations of landing gears. This work presents a static analysis and a tire-pavement contact dynamics through a three dimensional model in finite elements, used to investigate the structural behavior, regarding the deflections (vertical displacements), tensions and deformations of an airport runway under landing conditions of NLA for the most critical situations (without considering the aircraft rigidity and landing gear damping). Besides the NLAs, were also considered the Airbus A340-600 and Boeing 777-300, generic common aircrafts, for comparison purposes. The airport pavement was developed in computational modeling and linear elastic behavior, as a multilayer type structure. The tire was modelled as a single wheel of the aircraft's main landing gear, also considered with linear elastic behavior, whose structure was designed according to the actual geometry. The results of the dynamics analysis at the time of landing were compared with those of the static analysis. It was observed that the aircraft that most produces deflection (vertical displacement), tension and deformation to the airport pavement, among those analyzed in this study, was the airbus A340-600. On the other hand, the aircrafts that least produce deflection, tension and deformation to the airport pavement were the Airbus A380, which happens to be the largest commercial plane in the world (in dynamic analysis) and the Boeing 747-8 (in static analysis).

**Keywords:** Aircraft landing, dynamic impact coefficient, airport pavement, finite elements.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 –	POUSO DA AERONAVE AIRBUS A380 NO AEROPORTO DE CUMBICA EM SÃO PAULO.....	24
FIGURA 2 –	RESPOSTA MECÂNICA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL SUBMETIDO A CARGA DE RODA.....	34
FIGURA 3 –	DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS DA AERONAVE POR TREM DE POUSO.....	35
FIGURA 4 –	IDEALIZAÇÃO DO IMPACTO LATERAL EM PONTES FERROVIÁRIAS.....	37
FIGURA 5 –	MODELO EM ELEMENTOS FINITOS DE PONTE MULTI-VIGAS..	38
FIGURA 6 –	ANÁLISE EXPERIMENTAL DO IMPACTO DE RODAS EM MOVIMENTO (EM TRAFÉGO).....	39
FIGURA 7 –	MODELO EM ELEMENTOS FINITOS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL E DAS RODAS DA AERONAVE BOEING 737-200.....	39
FIGURA 8 –	ANÁLISE DE TENSÕES DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO EM PLANTA E EM CORTE AA (TENSÕES DE VON MISES: UNIDADE EM PASCAL). ....	40
FIGURA 9 –	DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PAVIMENTO EM CORTE AA (UNIDADE EM METROS).....	40
FIGURA 10 –	ATERRISSAGEM DE UMA AERONAVE EM PISTA DE AEROPORTO E IDEALIZAÇÃO DO MODELO PELO MÉTODO DA FUNDAÇÃO DE WINKLER. ....	41
FIGURA 11 –	VARIAÇÃO DA DEFLEXÃO NA ANÁLISE DE IMPACTO NO POUSO. ....	42
FIGURA 12 –	VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE IMPACTO (ADIMENSIONAL)..	42
FIGURA 13 –	ESBOÇO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO SIMULADO, EM PLANTA E EM CORTE (UNIDADE EM METROS).....	43



FIGURA 14 –	MODELO EM ELEMENTOS FINITOS DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO COMPOSTO PELA CONFIGURAÇÃO DAS RODAS DA AERONAVE BOEING 777-300, NO POUSO.....	45
FIGURA 15 –	FORMULAÇÃO DA CARGA DE IMPACTO RETANGULAR SOBRE O PAVIMENTO COBERTO POR UMA CAPA DE GELO. ....	46
FIGURA 16 –	DESCRIÇÃO GRÁFICA DA INTEGRAÇÃO EXPLÍCITA NO TEMPO. ....	48
FIGURA 17 –	DESCRIÇÃO GRÁFICA DA INTEGRAÇÃO IMPLÍCITA NO TEMPO. ....	49
FIGURA 18 –	MÉTODO DA DIFERENÇA CENTRAL UTILIZADO PELO ANSYS LS-DYNA.....	51
FIGURA 19 –	EXEMPLOS COMUNS DE COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR. ....	56
FIGURA 20 –	SÓLIDOS EM CONTATO NO INSTANTE $t$ .....	57
FIGURA 21 –	DEFINIÇÕES USADAS EM ANÁLISE DE CONTATO. ....	59
FIGURA 22 –	DETALHE DO TREM DE POUSO PRINCIPAL DA AERONAVE NORTE AMERICANA XB-70 VALKYRIE, UMA DAS DUAS PERNAS. ....	61
FIGURA 23 –	COMPRIMENTO, ENVERGADURA E ALTURA DA AERONAVE AIRBUS A380 (UNIDADE EM METROS). ....	63
FIGURA 24 –	CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL E DE NARIZ DO AIRBUS A380 (UNIDADE EM METROS). ....	63
FIGURA 25 –	COMPRIMENTO, ENVERGADURA E ALTURA DA AERONAVE AIRBUS A340-600 (UNIDADE EM METROS). ....	64
FIGURA 26 –	CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL E SECUNDÁRIO DO AIRBUS A340-600 (UNIDADE EM METROS). .	64
FIGURA 27 –	AERONAVE BOEING 747. ....	65
FIGURA 28 –	CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL E SECUNDÁRIO DO BOEING 747-8 (UNIDADE EM METROS). ....	65

FIGURA 29 –	AERONAVE BOEING 777. ....	66
FIGURA 30 –	CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL E SECUNDÁRIO DO BOEING 777-300 (UNIDADE EM METROS). ..	66
FIGURA 31 –	ÂNGULO DA RAMPA DE APROXIMAÇÃO $\theta$ NO INSTANTE DO POUSO DAS AERONAVES.....	68
FIGURA 32 –	AERONAVES E TRÁFEGO ANUAL ADOTADO NO DIMENSIONAMENTO VIA SOFTWARE FAARFIELD VERSÃO V 1.42.....	72
FIGURA 33 –	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO VIA SOFTWARE FAARFIELD VERSÃO V 1.42.....	72
FIGURA 34 –	MONTAGEM DAS CAMADAS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL E O SUBLEITO, COM SUAS RESPECTIVAS ESPESSURAS (UNIDADE EM MILÍMETROS).....	73
FIGURA 35 –	ÁREA DE CONTATO REAL ENTRE A SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO E O PNEU.....	76
FIGURA 36 –	POSICIONAMENTO DA ÁREA DE CONTATO EQUIVALENTE NO PAVIMENTO FLEXÍVEL EM 3D (UNIDADE EM METROS).....	77
FIGURA 37 –	DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO DE VALIDAÇÃO A (UNIDADE EM METROS). ....	78
FIGURA 38 –	MALHA EM ELEMENTOS FINITOS DAS ANÁLISES ESTÁTICAS COM AS CONDIÇÕES DE CONTORNO: a) MODELO A2 E b) MODELO A5 (UNIDADE EM METROS).....	79
FIGURA 39 –	TENSÕES $\sigma_x$ NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A: a) MODELO A2 E b) MODELO A5 (UNIDADE EM PASCAL).....	79
FIGURA 40 –	TENSÕES $\sigma_y$ NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A: a) MODELO A2 E b) MODELO A5 (UNIDADE EM PASCAL).....	80

FIGURA 41 –	TENSÕES $\sigma_z$ NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A: a) MODELO A2 E b) MODELO A5 (UNIDADE EM PASCAL).....	80
FIGURA 42 –	DEFLEXÃO (DESLOCAMENTOS $u_y$ ) NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A: a) MODELO A2 E b) MODELO A5 (UNIDADE EM METROS).....	81
FIGURA 43 –	CONFIGURAÇÃO UTILIZADA NA ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS BIDIMENSIONAL: a) DUNCAN et. al (1968) E b) SILVA (1995) (DESENHO SEM ESCALA). ....	82
FIGURA 44 –	CONFIGURAÇÃO DA MALHA EM ELEMENTOS FINITOS PARA FORMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL COM ELEMENTOS DE 8 NÓS. ....	83
FIGURA 45 –	TENSÕES NO TOPO E FUNDO DO SUBLEITO PARA DIFERENTES ESPESSURAS DE SUBLEITO. ....	84
FIGURA 46 –	DEFLEXÕES (DESLOCAMENTOS $u_y$ ) NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A COM AS DIMENSÕES ADEQUADAS (UNIDADE EM METROS). ....	85
FIGURA 47 –	DEFLEXÕES MÁXIMAS NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO EM FUNÇÃO DO a) LIMITE RADIAL DE APLICAÇÃO DA CARGA E DA b) ESPESSURA DO SUBLEITO, PARA OS MODELOS DE ANÁLISES ESTÁTICAS SEM E COM A ÁREA DE INFLUÊNCIA IDEAL.....	86
FIGURA 48 –	MALHA EM ELEMENTOS FINITOS E DEFLEXÕES (DESLOCAMENTOS $u_y$ ) NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A7. ....	87
FIGURA 49 –	GEOMETRIA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL AEROPORTUÁRIO PARA ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA DE IMPACTO, COM SUBLEITO DE 12 METROS DE ESPESSURA.....	89
FIGURA 50 –	PNEUS RADIAIS AERONÁUTICOS.....	90
FIGURA 51 –	ESTRUTURA DO PNEU RADIAL AERONÁUTICO. ....	91

FIGURA 52 –	MALHA EM ELEMENTOS FINITOS COM AS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO ESTÁTICO E DINÂMICO DO ESTUDO. .....	93
FIGURA 53 –	DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM METROS). ....	95
FIGURA 54 –	SISTEMA DE UM GRAU DE LIBERDADE MASSA, MOLA E AMORTECEDOR.....	96
FIGURA 55 –	DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE FORÇAS ATUANDO EM UMA RODA. ....	97
FIGURA 56 –	RESPOSTA EM TERMOS DAS DEFLEXÕES (DESLOCAMENTO $u_y$ ) DA ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM METROS).....	99
FIGURA 57 –	TENSÕES $\sigma_x$ DA ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM PASCAL). .....	100
FIGURA 58 –	TENSÕES $\sigma_y$ DA ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM PASCAL). .....	101
FIGURA 59 –	TENSÕES $\sigma_z$ DA ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM PASCAL). .....	102
FIGURA 60 –	DEFLEXÕES (DESLOCAMENTOS $u_y^{d,máx.}$ ) MÁXIMAS DOS NÓS MAIS SOLICITADOS NA SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO FLEXÍVEL AO LONGO DO TEMPO. DIREÇÃO TRANSVERSAL E LONGITUDINAL NO INSTANTE DO POUSO DAS AERONAVES.	105
FIGURA 61 –	DESLOCAMENTO VERTICAL DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO PARA O A380 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM METROS). .....	106
FIGURA 62 –	DESLOCAMENTO VERTICAL DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO PARA O A340-600 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM METROS). ....	107
FIGURA 63 –	DESLOCAMENTO VERTICAL DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO PARA O B747-8 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM METROS). .....	108

FIGURA 64 –	DESLOCAMENTO VERTICAL DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO PARA O B777-300 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM METROS).....	109
FIGURA 65 –	TENSÕES MÁXIMAS DOS NÓS MAIS SOLICITADOS AO LONGO DO TEMPO NO INSTANTE DO POUSO DAS AERONAVES.....	111
FIGURA 66 –	TENSÃO $\sigma_y$ DO A380 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM PASCAL).....	112
FIGURA 67 –	TENSÃO $\sigma_y$ DO A340-600 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM PASCAL).....	113
FIGURA 68 –	TENSÃO $\sigma_y$ DO B747-8 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM PASCAL).....	114
FIGURA 69 –	TENSÃO $\sigma_y$ DO B777-300 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM PASCAL).....	115
FIGURA 70 –	VARIAÇÃO DA DEFLEXÃO (DESLOCAMENTO $u_y^{d,máx.}$ ). ....	117
FIGURA 71 –	VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE IMPACTO $\xi$ (ADIMENSIONAL). ....	119
FIGURA 72 –	GEOMETRIA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL SEM SIMETRIA (UNIDADE EM METROS).....	135
FIGURA 73 –	PNEU RADIAL MODELO 495/45 R22.5 169J. ....	136
FIGURA 74 –	ESTRUTURA DO PNEU RADIAL. ....	136
FIGURA 75 –	DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO DE VALIDAÇÃO B (UNIDADE EM METROS). ....	137
FIGURA 76 –	MALHA EM ELEMENTOS FINITOS. ....	138
FIGURA 77 –	DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO MODELO COMPUTACIONAL B (UNIDADE EM METROS).....	138
FIGURA 78 –	MÁQUINA DE TESTES DA NAPTF. ....	140

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	PRINCIPAIS DIFERENÇAS DAS RODOVIAS E AERÓDROMOS. . 32
TABELA 2 –	PARÂMETROS DOS MATERIAIS E GEOMETRIA DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO UTILIZADO PARA ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS..... 44
TABELA 3 –	CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES TIPOS DE ESTRUTURAS COM SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE IMPACTO. .... 47
TABELA 4 –	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DIRETA EXPLÍCITO E IMPLÍCITO..... 54
TABELA 5 –	ALGUNS TIPOS DE NÃO LINEARIDADES ESTABELECIDOS. .... 56
TABELA 6 –	TIPOS DE CONTATO DO ANSYS/LS-DYNA. .... 60
TABELA 7 –	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS AERONAVES..... 67
TABELA 8 –	CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL DAS AERONAVES,..... 68
TABELA 9 –	VALORES DE RESISTÊNCIA DE SUBLEITO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO ACN/PCN EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS. .... 70
TABELA 10 –	FREQUÊNCIA ANUAL DE DECOLAGENS DAS AERONAVES NO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO NO BRASIL E DE ATLANTA NOS EUA. .... 71
TABELA 11 –	CÓDIGO DE PRESSÃO DOS PNEUS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO ACN-PCN..... 73
TABELA 12 –	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL E SUBLEITO. .... 74
TABELA 13 –	ESTRUTURA DA MODELAGEM COMPUTACIONAL. .... 74
TABELA 14 –	MODELAGEM NUMÉRICA DE VALIDAÇÃO. .... 75



TABELA 15 –	QUANTIDADE DE ELEMENTOS FINITOS POR CAMADAS NO MODELO A. ....	78
TABELA 16 –	TENSÕES NO TOPO E FUNDO DO SUBLEITO (SL).....	80
TABELA 17 –	DEFLEXÃO (DESLOCAMENTOS $u_y$ ) NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO, NO TOPO DO SUBLEITO E A 1,5 METROS ABAIXO DO TOPO DO SUBLEITO. ....	81
TABELA 18 –	DIMENSÕES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS NA MODELAGEM COMPUTACIONAL E DEFLEXÕES (DESLOCAMENTOS $u_y$ ) NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO. ....	85
TABELA 19 –	PERCENTUAL DA DIFERENÇA DE DEFLEXÕES MÁXIMAS NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO COM E SEM A ÁREA DE INFLUÊNCIA IDEAL NA ANÁLISE.....	86
TABELA 20 –	DIMENSÕES DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL ADOTADO NA MODELAGEM DE ANÁLISE DINÂMICA. ....	88
TABELA 21 –	CARACTERÍSTICAS DA GEOMETRIA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL AEROPORTUÁRIO PARA AS ANÁLISES ESTÁTICAS E DINÂMICAS.....	89
TABELA 22 –	CARACTERÍSTICAS DOS PNEUS RADIAIS AERONÁUTICOS. ...	91
TABELA 23 –	ESTRUTURA DO PNEU RADIAL AERONÁUTICO.....	92
TABELA 24 –	ÁREA DE CONTATO PROVOCADO PELA CARGA E PRESSÃO DAS AERONAVES.....	94
TABELA 25 –	PERCENTUAL DE REDUÇÃO DA CARGA COM APLICAÇÃO DA RIGIDEZ $k$ E AMORTECIMENTO $c$ POR DIVERSOS PESQUISADORES.....	97
TABELA 26 –	COEFICIENTE DE ATRITO PARA PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO. ....	98
TABELA 27 –	DEFLEXÕES (DESLOCAMENTOS $u_y^{e,máx.}$ ) NAS CAMADAS: ANÁLISE ESTÁTICA. ....	99

TABELA 28 –	TENSÕES MÁXIMAS NO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO: ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM MEGAPASCAL). ....	100
TABELA 29 –	TEMPO REAL E COMPUTACIONAL DAS SIMULAÇÕES DAS ANÁLISES DINÂMICAS. ....	104
TABELA 30 –	DEFLEXÃO (DESLOCAMENTOS $u_y^{d,máx.}$ ) NA SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO FLEXÍVEL DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO: ANÁLISES DINÂMICAS. ....	104
TABELA 31 –	TENSÕES MÁXIMAS PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO NA SUPERFÍCIE E NO FUNDO (TOPO DA BASE) DO REVESTIMENTO FLEXÍVEL PARA AS ANÁLISES DINÂMICAS. ....	110
TABELA 32 –	DEFORMAÇÕES MÁXIMAS NA SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO FLEXÍVEL NO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO PARA AS ANÁLISES DINÂMICAS (ADIMENSIONAL). ....	116
TABELA 33 –	COEFICIENTES DE IMPACTO PROPOSTOS NESTA PESQUISA (ADIMENSIONAL). ....	119
TABELA 34 –	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL E SUBLEITO UTILIZADOS NO MODELO DE VALIDAÇÃO B. ....	134
TABELA 35 –	CARACTERÍSTICAS DO PNEU RADIAL, MODELO 495/45 R22,5 169J. ....	135
TABELA 36 –	ESTRUTURA DO PNEU RADIAL NA MODELAGEM COMPUTACIONAL B. ....	136
TABELA 37 –	QUANTIDADE DE ELEMENTOS FINITOS POR CAMADAS DO PAVIMENTO DO MODELO B. ....	137
TABELA 38 –	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE DEFLEXÕES MÁXIMAS $u_y^{máximo}$ DOS MODELOS COMPUTACIONAIS. ....	138

## LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

ABAQUS™	– <i>Software</i> comercial para análise por elementos finitos
ABNT	– Associação Brasileiras de Normas Técnicas
ACN	– <i>Aircraft Classification Number</i>
ADINA	– <i>Software</i> comercial para análise por elementos finitos
AMP	– Aeronaves modernas pesadas
ANAC	– Agência Nacional de Aviação Civil
ANSYS	– <i>Software</i> comercial para análise por elementos finitos
BGS	– Brita graduada simples
BNDES	– Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAP	– Cimento asfáltico de petróleo
CBR	– <i>California Bearing Ratio</i> ou Índice de Suporte California
CBUQ	– Concreto betuminoso usinado à quente
DNIT	– Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
FAA	– <i>Federation Aviation Administration</i>
FEPAVE	– <i>Finite Element Analysis of Pavement Structures</i>
GPDAI	– Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento Avançado em Infraestruturas
ICAO	– <i>International Civil Aviation Organization</i>
IATA	– <i>International Air Transport Association</i>
ICCT	– <i>The International Council on Clean Transportation</i>
MDD	– <i>Multi-Deph Deflectometer</i>
MEF	– Método dos elementos finitos
NAPTF	– <i>National Airport Pavement Test Facility</i>
NBR	– Norma Brasileira
NGA	– <i>New Generation Aircraft</i>
PCN	– <i>Pavement Classification Number</i>
PMD	– Peso máximo de decolagem
PMP	– Peso máximo de pouso
PP	– Pressão nos pneus
PPGECC	– Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil

QDA	– Quantidade de decolagens anual
QTP	– Quantidade total de passageiros
SGPA	– Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários
UFPR	– Universidade Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

$m$	– Metro
$\text{MPa}$	– Megapascal
$\text{tf}$	– Tonelada força
$\text{mm}$	– Milímetro
$x$	– Coordenada no eixo x
$y$	– Coordenada no eixo y
$z$	– Coordenada no eixo z
$n_1$	– Nó 1
$n_2$	– Nó 2
$n_3$	– Nó 3
$t$	– Tempo
$t_n$	– Tempo em um determinado ponto
$[M]$	– Matriz de massa
$[C]$	– Matriz de amortecimento
$[K]$	– Matriz de rigidez
$\{\ddot{u}\}$	– Vetor de aceleração
$\{\dot{u}\}$	– Vetor de velocidade
$\{u\}$	– Vetor de deslocamento
$\{F^a\}$	– Vetor de forças aplicadas
$m_n$	– Massa $n$
$c_n$	– Amortecimento $n$
$\Delta t$	– Variação do tempo
$\Delta \dot{u}$	– Variação da aceleração
$\Delta u$	– Variação do deslocamento
$\Delta x$	– Variação da distância
$S_c$	– Superfície da área de contato

$N$	– Corpo de contato
$L$	– Determinado corpo de contato
$\sum$	– Somatório
$\int$	– Integral indefinida
$f^{IJ}$	– Componente de força devido ao contato no corpo $I$
$f^{JI}$	– Componente de força devido ao contato no corpo $J$
$\delta u_i^{IJ}$	– Deslocamento virtual sobre a superfície de contato do corpo $I$
$\delta u_i^{JI}$	– Deslocamento virtual sobre a superfície de contato do corpo $J$
$S^{IJ}$	– Superfície contatora
$S^{JI}$	– Superfície alvo
$n$	– Vetor externo normal
$s$	– Vetor externo tangencial
$\lambda$	– Componente da força normal
$\gamma$	– Componente da força tangencial
$n^*$	– Vetor unitário normal
$s^*$	– Vetor unitário tangencial
$V_P$	– Velocidade de pouso
$V_P^x$	– Velocidade de pouso horizontal
$V_P^y$	– Velocidade de pouso vertical
$E$	– Módulo de elasticidade
$m$	– Unidade de medida em metro
$c$	– Velocidade do som
$L_1$	– Comprimento da aeronave
$L_2$	– Envergadura da aeronave
$L_3$	– Altura da aeronave
$\nu$	– Coeficiente de Poisson
$L$	– Comprimento



$e$	– Espessura
$\rho$	– Massa específica ou densidade
$\text{kg/m}^3$	– Quilograma por metro cúbico
$L$	– Comprimento
$\text{kN}$	– Quilonewton
$A_c$	– Área de contato
$p$	– Carga da roda
$\sigma$	– Pressão de inflação
$\sigma_x$	– Tensão no eixo x
$\sigma_y$	– Tensão no eixo x
$\sigma_z$	– Tensão no eixo x
$\varepsilon_x$	– Deformação no eixo x
$\varepsilon_y$	– Deformação no eixo y
$\varepsilon_z$	– Deformação no eixo z
$u_y$	– Deslocamento no eixo y
$\text{pol}$	– Polegada
$\text{kg}$	– Quilograma
$\text{km/h}$	– Quilometro por hora
$u_y^{\text{máximo}}$	– Deslocamento no eixo y máximo
$\eta$	– Quantidade de rodas do trem de pouso principal da aeronave
$m$	– Massa
$k$	– Rigidez
$c$	– Amortecimento
$h$	– Horas
$V$	– Velocidade
$\Delta S$	– Distância
$\xi$	– Coeficiente de impacto
$u_y^{d,\text{máx.}}$	– Deslocamento vertical máximo da análise dinâmica

$u_y^{e,máx.}$  – Deslocamento vertical máximo da análise estática

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	24
1.1	OBJETIVO	26
1.2	JUSTIFICATIVA	27
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	29
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	30
2.1	PAVIMENTOS EM AEROPORTOS	30
2.1.1	Pavimentos Flexíveis	33
2.2	IMPACTO DINÂMICO E A INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO	34
3	<b>ANÁLISE DINÂMICA EXPLÍCITA</b>	48
3.1	ANÁLISE NÃO LINEAR	55
3.2	CONTATO	56
3.3	CONTATOS NO ANSYS	59
4	<b>METODOLOGIA</b>	61
4.1	AERONAVES	61
4.1.1	Airbus A380	62
4.1.2	Airbus A340-600	64
4.1.3	Boeing 747-8	65
4.1.4	Boeing 777-300	66
4.1.5	Resumo das características técnicas das aeronaves utilizadas nesta pesquisa	67
4.2	PAVIMENTO DE PISTAS DE AEROPORTOS	69
4.3	MODELAGEM COMPUTACIONAL	74
4.3.1	Validação do modelo	75
4.3.2	Definição da geometria do modelo	88
4.3.3	Propriedades dos materiais	92
4.3.4	Modelos estático e dinâmico	92
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	99
5.1	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES ESTÁTICAS	99
5.2	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DINÂMICAS	103
5.3	COEFICIENTES DE IMPACTO	118
6	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS</b>	121
	<b>REFERÊNCIAS</b>	123
	<b>APÊNDICE – A</b>	132

<b>APÊNDICE – B.....</b>	<b>134</b>
--------------------------	------------

## 1 INTRODUÇÃO

Desde suas origens, e principalmente desde o final dos anos 1920 até os dias atuais, o transporte aéreo tem sofrido grandes mudanças tecnológicas que impactam diretamente na infraestrutura aeroportuária. A indústria aeronáutica sempre esteve atenta às exigências cada vez maiores, cabendo a evolução necessária à cada ciclo da história, como as exigências das guerras mundiais, ciclos de ouro da aviação, descobrimento de turbinas e materiais mais leves. Atualmente, depara-se com o grande crescimento do tráfego aéreo, que tem desafiado a indústria a desenvolver novos produtos e infraestruturas aeroportuárias, a fim de atender à demanda. Em 2016, o número de viagens nacionais e internacionais de passageiros no mundo aumentou 8,6% se comparado ao ano anterior, de acordo com a *International Air Transport Association* – IATA (2016).

O surgimento de aeronaves de grande porte, como forma de suprir a necessidade de atender o aumento da demanda de voos comerciais, aparece em meados dos anos 1990. O A380 é o maior avião comercial do mundo voando hoje (FIGURA 1), esta aeronave tem capacidade máxima de 853 passageiros e pode atingir até 575 toneladas voando a uma velocidade de 900 km/h, com autonomia máxima para voos de até 15200 km de distância. Isto torna evidente a necessidade de se reavaliar requisitos de infraestruturas aeroportuárias, sendo uma delas, as estruturas de pavimentos aeroportuários que são cada vez mais solicitados, tanto em termos de frequência quanto de cargas (BARROS; WIRASINGHE, 2002).

FIGURA 1 - POUSO DA AERONAVE AIRBUS A380 NO AEROPORTO DE CUMBICA EM SÃO PAULO.



FONTE: Folha de São Paulo (2007).

Segundo a *Federation Aviation Administration* – FAA (2009), para produzir tais pavimentos é necessária a coordenação de fatores de projeto, construção, inspeção e alto padrão de acabamento. Esses fatores visam assegurar a melhor combinação possível de materiais de pavimentação com a qualidade na realização dos projetos.

Além da constante modernização a que os aeroportos estão sujeitos e da existência de limitados e recentes estudos avançados em pavimentação aeroportuária, os problemas ainda surgem juntamente com a necessidade de pesquisas envolvendo melhorias na concepção, dimensionamento, compreensão dos fenômenos que afetam a estrutura e a escolha racional dos materiais.

Este trabalho tem por objetivo melhorar o entendimento do comportamento estrutural de pavimentos aeroportuários sob condições de pouso das aeronaves modernas pesadas (AMP) para as situações mais críticas sem a consideração de rigidez da aeronave e amortecimento do trem de pouso, através da análise numérica em elementos finitos com o *software* ANSYS.

Neste trabalho, a delimitação foi definida em termos de dois aspectos: aeronaves e pavimento aeroportuário. Quanto às aeronaves, a análise foi composta por quatro diferentes modelos: Airbus A380, Airbus A340-600, Boeing 747-8 e Boeing 777-300. Para a análise principal, onde o trabalho se concentra, o comportamento da pista de aeroporto foi delimitado a apenas um tipo de pavimento aeroportuário, o flexível.

A motivação deste trabalho deu-se pela escassez de estudos que considerem os efeitos no comportamento estrutural em termos de deflexões, tensões e deformações, bem como o impacto dinâmico das AMP sobre os pavimentos e as relações que regem o contato entre os pneus de um trem de pouso e a superfície dos pavimentos.

Na literatura há escassos trabalhos conduzidos nesta linha, uma vez que, somente o avanço tecnológico das últimas décadas na informática – e consequentemente o desenvolvimento de ferramentas numéricas mais eficientes e completas – vem permitindo a modelagem de sistemas estruturais multicamadas, considerando diversas situações de carregamento e hipóteses mais complexas, tais como as que foram consideradas neste trabalho.



## 1.1 OBJETIVO

Esta dissertação tem por objetivo analisar o comportamento estrutural quanto às deflexões (deslocamentos verticais), deformações e tensões do pavimento flexível de pistas de aeroportos durante o pouso das AMP, para as situações mais críticas, através de um modelo numérico em elementos finitos sem a consideração de rigidez da aeronave e amortecimento do trem de pouso.

Os pavimentos de pistas de aeroportos são dimensionados para a operação de decolagem, onde as maiores cargas estão presentes (SCHMID, 2016)<sup>1</sup>. No entanto, as maiores solicitações em termos de impacto são esperadas durante o pouso. A partir da análise e modelagem das solicitações dinâmicas durante estas operações, é possível avaliar corretamente os efeitos do impacto da aeronave sobre os pavimentos. A presente pesquisa pretende contribuir em trabalhos futuros com a proposta ou o desenvolvimento de novos materiais tanto para o pavimento aeroportuário quanto para o trem de pouso da aeronave, a fim de mitigar os efeitos dinâmicos provocados.

Como objetivo específico, este trabalho propõe a comparação das situações estática (considerando o peso máximo de decolagem) e dinâmica (considerando o peso máximo de pouso) para AMP e aeronaves comerciais comuns (no transporte de passageiros).

O presente trabalho pretende ainda gerar e apresentar uma base de dados consistente, podendo servir de apoio para especificações utilizadas na análise e no dimensionamento de pavimentos aeroportuários, na forma de coeficientes de impacto.

Como objetivo adicional, este trabalho – pioneiro nas linhas de pesquisas do GPDAI (Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento Avançado em Infraestruturas) e em transportes, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) – proporcionará subsídios e experiência para a posterior aplicação extensiva em problemas diversos que envolvam análises dinâmicas e de contato, como por exemplo, com aplicações em pontes, rodovias, ferrovias, simulação de acidentes e estudo dos mecanismos relacionados à falha das mesmas.

---

<sup>1</sup> SCHMID, M. T. **Dimensionamento de pavimentos aeroportuários**. Curitiba, 2016. Entrevista pessoal ao autor em 14/04/2016.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

No PPGECC da UFPR, esta pesquisa encontra-se dentro da área de concentração em materiais e estruturas, sendo linha de pesquisa em sistemas estruturais com foco em pavimentos aeroportuários.

A otimização de recursos econômicos, materiais e operacionais neste tipo de empreendimento é de fundamental importância, pelo fato dos aeroportos serem custeados também, com recursos públicos (BNDES, 2016).

Segundo Medina e Motta (2015), a quantidade de aeródromos<sup>2</sup> no Brasil, em 2013, era de 2057, sendo 715 públicos e 1792 privados. Porém, de acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2017), a quantidade de aeródromos no Brasil aumentou em 18,91% chegando a 2446 aeródromos, sendo 589 públicos e 1857 privados.

Um maior entendimento sobre o comportamento estrutural dos pavimentos aeroportuários, colaborará com a redução dos custos operacionais, com a diminuição da extração de matéria-prima para uso em sua construção e manutenção e, também com o meio ambiente, oferecendo uma infraestrutura mais adequada.

O surgimento das AMP contribui com a redução das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, uma vez que mais passageiros são transportados em uma única viagem. No Airbus A380, por exemplo, essa emissão é cerca de 75 gramas de CO<sub>2</sub> por passageiro em um quilômetro percorrido, que é abaixo dos índices atuais e futuros internacionalmente previstos (AIRBUS, 2016). De acordo com *The International Council on Clean Transportation* – ICCT (2016), a meta prevista para emissão de CO<sub>2</sub> para o ano de 2020 é que seja de 95 gramas por passageiro em um quilômetro percorrido.

Segundo Barros e Wiransinghe (2002), as AMP podem trazer alívio ao congestionamento no sistema aeroportuário com o aumento do número de passageiros por viagens de aeronaves. A utilização de AMP, como o modelo A380, é a solução ideal para aliviar o congestionamento de tráfego nos aeroportos lotados e maximizar a rentabilidade nas rotas mais movimentadas do mundo, proporcionando também maior conforto aos seus usuários, evitando filas e atrasos (AIRBUS, 2016).

---

<sup>2</sup> Aeródromo é toda área que possui, relativamente, uma estrutura e serve para pouso e decolagem de aeronaves. Por sua vez, o aeroporto é um aeródromo dotado de instalações para facilitar o embarque e desembarque de pessoas e cargas (ANAC, 2016).

Por outro lado, a fabricante de aeronaves Boeing defende que aeronaves que proporcionam maior rapidez nas viagens são mais eficientes e, segundo essa diretriz, sua produção tem sido orientada às tecnologias que melhorem a potência das turbinas. Segundo a Boeing, o aumento do tráfego aéreo gera consequências como congestionamentos em aeroportos de grande porte e, uma solução para esse problema, seria a utilização de aeroportos menores (BOEING, 2014).

De acordo com Barros e Wiransighe (2002), para a utilização das AMP devem ser reavaliados muitos aspectos na elaboração e construção do projeto geométrico e estrutural das pistas de aeroporto, considerando: envergadura das aeronaves, carga de roda das AMP, largura das pistas devido as explosões dos jatos das turbinas, dimensionamento dos pavimentos, entre outros.

No entanto, segundo Donovan e Tutumluer (2007), as aeronaves da nova geração *New Generation Aircraft* – NGA<sup>3</sup>, afetam os pavimentos aeroportuários de forma diferente do que as aeronaves mais antigas, devido ao aumento de cargas e mudanças nas configurações dos trens de pousos.

No Brasil, não há uma norma específica ou instrução técnica clara para o dimensionamento de pavimentos aeroportuários, pois as normas utilizadas são as mesmas para os cálculos de edificações como, por exemplo, Projetos de Estruturas de Concreto – Procedimentos (NBR 6118:2014) e Execução de Estruturas de Concreto – Procedimentos (NBR 14931:2004), de acordo com Schmid (SCHMID, 2016)<sup>4</sup>.

Santos (2014) acredita que a escassez de pesquisas e investimentos na área de pavimentos aeroportuários pode ser um dos fatores predominantes para o desinteresse na utilização dos *softwares*, aliados ao desconhecimento teórico de métodos, que pode ser outro fator que inviabilizaria a substituição do cálculo mecanicista para o informatizado.

Em uma abordagem geral, os pavimentos rodoviários e aeroportuários são estudados e dimensionados através de análises que pressupõem apenas carregamentos estáticos, enquanto que na realidade os pavimentos são sujeitos a cargas estáticas e dinâmicas (ZAGHLOUL; WHITE, 1993).

---

<sup>3</sup> As NGA são caracterizadas pelas aeronaves Airbus A380, Boeing 747 e Boeing 777 (DONOVAN; TUTUMLUER, 2007)

<sup>4</sup> SCHMID, M. T. **Dimensionamento de pavimentos aeroportuários**. Curitiba, 2016. Entrevista pessoal ao autor em 14/04/2016.

O comportamento estrutural do pavimento aeroportuário na decolagem e, principalmente, durante o processo de pouso, para fins de projeto, tem sido um problema para os engenheiros. Como consequência, a maioria dos projetos de pavimentos ainda é baseada em conhecimentos empíricos, através da longa experiência na área (MALLICK; EL-KORCHI, 2009).

O pavimento aeroportuário não falha de forma catastrófica, em vez disso, ele sofre desgaste ao longo do tempo, devido aos inúmeros processos de pousos e decolagens. Com isso, a avaliação do seu desempenho torna-se difícil, resultando no problema de que nenhuma equação analítica pode ser fornecida como solução (ASHFORD; WRIGHT, 1992).

Segundo Medina e Motta (2015), o método de dimensionamento de pavimento flexível carece de aprofundamento da análise teórica e da não utilização de parâmetros experimentais de deformabilidade de solos e materiais de pavimentação no país. Repetem-se os métodos de dimensionamento empíricos de origem estrangeira, desenvolvidos para condições de solos e climas diferentes do meio físico tropical de nosso país.

Segundo Yadav e Shukla (2012), as pesquisas mostram que a análise do comportamento estrutural referente às tensões, deformações e deflexões dinâmicas do pavimento aeroportuário no ponto de impacto causado pelo pouso das aeronaves, não têm recebido sua devida atenção.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é organizado da seguinte forma: no primeiro capítulo foram apresentados o objetivo, a justificativa e a estrutura do trabalho. O segundo capítulo contempla a revisão bibliográfica contendo estudos históricos relevantes relacionados ao impacto dinâmico, a interação pneu-pavimento e pavimentos aeroportuários. O Capítulo 3, contempla os conceitos acerca da análise dinâmica explícita. Por seguinte, o Capítulo 4 exibe a metodologia utilizada para a realização deste estudo, e no quinto capítulo os resultados obtidos numericamente são apresentados, seguidos da análise dos resultados. Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as considerações e conclusões finais, contendo ainda sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta os antecedentes e trabalhos históricos relacionados a esta pesquisa, constituindo acervos nacionais e internacionais de teses, dissertações, documentos técnicos, periódicos, artigos e normas de organizações regulamentadoras da aviação civil. Trabalhos com ênfase em pavimentos aeroportuários e aeronaves, principalmente nos temas relacionados a coeficientes de impacto e contato entre pneus e o pavimento aeroportuário.

### 2.1 PAVIMENTOS EM AEROPORTOS

A prática da pavimentação de vias para unir localidades e demais funções é algo que acontece desde a antiguidade. Os egípcios e gregos estavam entre os primeiros povos a executar este tipo de estrutura, onde tinham como pretensão o aspecto decorativo das festividades religiosas de desfiles da época (a.C.) (CORINI, 1947). O primeiro método para dimensionamento de pavimentos flexíveis surgiu na década de 1920, o método do CBR (*California Bearing Ratio* ou Índice de Suporte California), com o engenheiro O. J. Porter, que ficou consolidado durante a Segunda Guerra Mundial devido à necessidade de construção de aeroportos para fins militares, já que era necessário um critério de dimensionamento simples, rápido e eficiente, para as pistas de pouso e decolagem das pesadas aeronaves da época (BALBO, 2007).

No entanto, o método mais conhecido e utilizado no dimensionamento de pavimentos aeroportuários ainda tem seus fundamentos nos parâmetros de suporte do CBR, que é o método da FAA (MEDINA; MOTTA, 2005; FAA, 2009).

No Brasil, a ANAC estabelece algumas diretrizes através de uma Instrução Suplementar (IS) e um manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários (SGPA), não possuindo natureza normativa, que serve de orientação para a aplicação do método ACN/PCN<sup>5</sup> de classificação dos pavimentos em aeroportos. Este método é utilizado para estabelecer a resistência de pavimentos destinados às aeronaves com mais de 5700 kg, e tem como objetivo aferir a

---

<sup>5</sup> A sigla ACN refere-se ao Número de Classificação da Aeronave (*Aircraft Classification Number*), que expressa o efeito relativo de uma aeronave com uma determinada carga sobre um pavimento, para uma categoria padrão de subleito especificada. A sigla PCN refere-se ao Número de Classificação do Pavimento (*Pavement Classification Number*), que expressa a capacidade de carga de um pavimento, sem especificar uma aeronave em particular ou informações detalhadas do pavimento (FAA, 2016; ANAC, 2016).

resistência do pavimento em função das características da aeronave (expressa pelo ACN) e do pavimento (expressa pelo PCN), sendo estruturado de maneira que um determinado pavimento com um valor de PCN seja capaz de suportar, sem restrições, uma determinada aeronave que tenha um valor de ACN menor ou igual ao valor de PCN do pavimento, obedecidas as limitações relativas à pressão dos pneus (FAA, 2016; ANAC, 2016).

Segundo Medina e Motta (2015), existem algumas diferenças importantes entre os pavimentos rodoviários e pavimentos aeroportuários (TABELA 1), principalmente no que se refere às características geométricas e físicas, solicitações e o tipo de tráfego. Ou seja, nos pavimentos aeroportuários ocorre um número menor de solicitações, porém, os valores de cargas são mais elevados. De forma geral, as espessuras e os materiais que são empregados nos pavimentos aeroportuários são equivalentes aos usados nos pavimentos rodoviários.

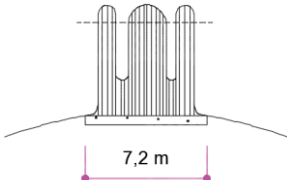
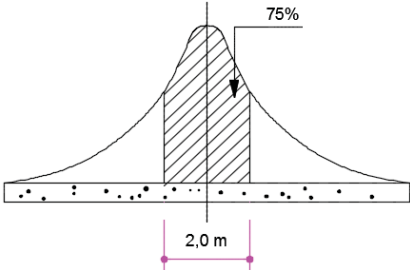
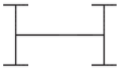
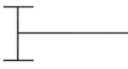
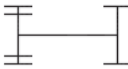
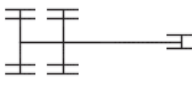
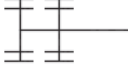
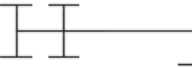

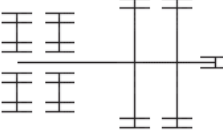
Segundo Ramos (2015), além das diferenças significativas referentes às cargas e solicitações dos pavimentos rodoviários e aeroportuários, há também um ponto significativo, e não menos importante, que são os esforços gerados pelo impacto no momento da aterrissagem das aeronaves, o que não ocorre em rodovias.

Os pavimentos aeroportuários são construídos para suportar as cargas impostas pelas aeronaves e proporcionar de forma adequada o seu deslocamento nos locais de circulação estabelecidos pelos aeroportos. A movimentação dessas cargas deve ser realizada visando o conforto, a eficiência no fluxo de tráfego e, principalmente a segurança. Logo, com a finalidade de cumprir satisfatoriamente esses requisitos, os pavimentos aeroportuários devem possuir qualidade e espessura suficiente para não falhar sob cargas e, além disso, apresentar um desempenho suficiente para resistir, sem danos, às intempéries, à ação abrasiva do tráfego, fadiga, às condições meteorológicas adversas e ao escoamento de gases combustíveis eliminados pelas aeronaves. Para isso, deve apresentar uma superfície firme, estável, livre de detritos ou outras partículas que possam de alguma forma ser expelidas ou captadas pelo deslocamento de ar, tanto pelo natural quanto pela hélice ou jato das aeronaves (FAA, 2009).

Os pavimentos tipicamente utilizados em pistas de aeroportos se classificam em dois tipos: rígidos e flexíveis. Esses pavimentos são estruturalmente formados por camadas estabilizadas ou não, dispostas de forma a resistir aos esforços (ASHFORD; MUMAYIZ; WRIGHT, 2011).



TABELA 1 – PRINCIPAIS DIFERENÇAS DAS RODOVIAS E AERÓDROMOS.

Características	Rodovias	Aeródromos
Largura das pistas	7 a 10 m	20 a 50 m (táxis: 10 a 25 m)
Comprimento	Vários quilômetros	Até cerca de 3000 m
Cargas	10 tf por eixo, veículo 45 tf máximo	100 tf ou mais por trem de pouso principal, aviões de até 500 tf
Frequência de repetição de cargas	Por exemplo: 2000 veículos por dia, vários milhões na vida de serviço, o efeito de fadiga dos materiais é importante	Pequena, por dia: 50 a 100; menos de 100000 na vida de serviço
Pressão dos pneumáticos	0,15 a 0,6 MPa	1,0 a 3,0 MPa
Distribuição transversal da carga nas pistas	 <p>7,2 m</p> <p>(Não se faz diferenciação transversal praticamente)</p>	 <p>75%</p> <p>2,0 m</p> <p>(Diferencia-se o dimensionamento transversalmente)</p>
Distância de drenagem	Pequena (3 m)	Grande (10 a 50 m)
Impacto de veículo no pavimento	Pequeno	Grande no pouso, porém minorado pela sustentação do ar e amortecimento
Ação de carga dinâmica (vibrações) de veículos parados	Não considerada	Importante nas cabeceiras das pistas, na decolagem e nas pistas de taxiamento
Ação de frenagem	Não é relevante; nas ruas sim, nos sinais luminosos (semáforos), nos cruzamentos, etc.	Importante quando do acionamento dos motores, com as rodas do trem de pouso travadas, antes da rodagem
Geometria de rodas	 <p>Caminhão leve</p>	 <p>Trem de pouso ciclico</p>
	 <p>Caminhão pesado</p>	 <p>Trem de pouso tandem duplo triciclo</p>
	 <p>Caminhão pesado</p>	 <p>Trem de pouso biciclo</p>
	 <p>Caminhão com reboque</p>	 <p>Trem de pouso de um jumbo</p>

FONTE: Medina e Motta (2015).

Segundo Oliveira (2009), os pavimentos das pistas de pousos e decolagens estão entre as mais importantes estruturas de um complexo aeroportuário, levando em consideração suas instalações, construções, equipamentos e facilidades de modo geral.

Nos aeroportos, há maior ocorrência de pavimentos flexíveis nos locais de menor incidência de cargas estáticas, impostas pelas aeronaves, tais como as pistas de pousos e decolagens, que são caracterizadas por uma maior frequência de utilização desse tipo de pavimento. Em contraste, os pavimentos rígidos são mais utilizados em locais de maior concentração estática de tensões, que geralmente são as zonas de estacionamento e hangares, situações em que a aeronave está com sua carga máxima estática ou quase estática (SCHMID, 2016)<sup>6</sup>.

Por este motivo, tratando-se das áreas de pousos e decolagens, e por ser bastante comum no Brasil, foi escolhido o pavimento flexível para o estudo de impacto das AMP.

### 2.1.1 Pavimentos Flexíveis

Os pavimentos flexíveis em geral, são constituídos por três camadas: sub-base, base e camada de revestimento (superfície betuminosa). Estas camadas são cuidadosamente compactadas e assentadas em um subleito preparado, podendo ser em aterro ou corte (ASHFORD; MUMAYIZ; WRIGHT, 2011).

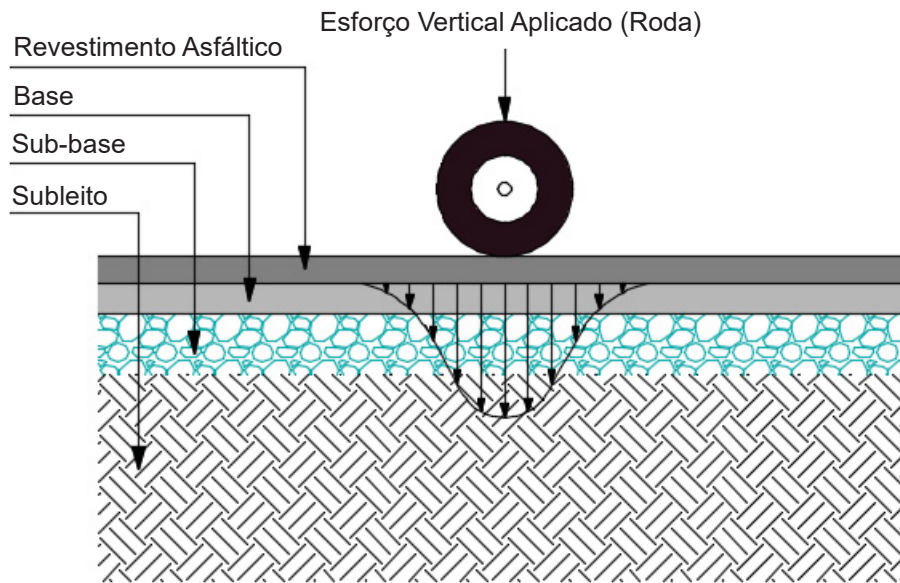
O comportamento estrutural de um pavimento flexível é diferente do pavimento rígido, uma vez que o carregamento é distribuído em parcelas que são aproximadamente equivalentes entre as camadas, distribuindo os esforços para uma área menor do subleito, como mostra a FIGURA 2. As deformações elásticas estão presentes em todas as camadas do pavimento flexível, de forma mais concentrada (DNIT, 2006).

Segundo Abdesssemed e Bali (2015), durante seu uso, os pavimentos aeroportuários flexíveis são submetidos a tensões contínuas, principalmente de cargas dinâmicas que incidem de forma repetida pela passagem das aeronaves.

---

<sup>6</sup> SCHMID, M. T. **Dimensionamento de pavimentos aeroportuários**. Curitiba, 2016. Entrevista em 14/04/2016.

FIGURA 2 – RESPOSTA MECÂNICA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL SUBMETIDO A CARGA DE RODA.



FONTE: Adaptado do Balbo (2007).

## 2.2 IMPACTO DINÂMICO E A INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO

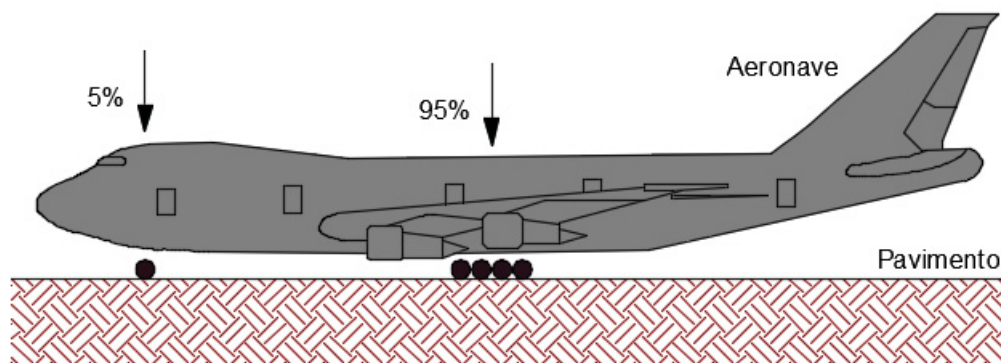
O impacto dinâmico é definido como o efeito do contato provocado por um sólido em movimento (descrito por sua massa, velocidade e aceleração), com algum outro objeto (anteparo) estático ou em movimento. Nesta dissertação, será realizada a modelagem do problema da interação entre os pneus do trem de pouso principal e o pavimento no momento do pouso, que segundo Roehrs (2002) é onde se encontram as situações mais críticas durante as operações de aterrissagens, a fim de avaliar os efeitos do impacto dinâmico.

As operações de aterrissagens consistem em trazer as aeronaves em contato com o solo a uma determinada velocidade (geralmente descritas através das componentes vertical e horizontal) mais baixa possível, com a finalidade de causar menor impacto ao pavimento aeroportuário (KERMODE, 2006). A velocidade vertical provoca um impacto sobre uma área finita na zona de toque da pista, resultando em uma deflexão significativa do pavimento aeroportuário (HORONJEFF; MCKELVEY, 1994).

Segundo Roehrs (2002), a distribuição de carga para os trens de pouso de uma aeronave no instante da aterrissagem é de aproximadamente 95% para a parte traseira (trem de pouso principal) e apenas 5% para a parte dianteira (trem de pouso

de nariz), como mostra a FIGURA 3, ou seja, o impacto provocado pela aeronave no instante do pouso é muito maior na parte traseira.

FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS DA AERONAVE POR TREM DE POUSO.



FONTE: Adaptado do Goldner (2012).

Os estudos na literatura envolvendo a interação do contato entre o pneu com o pavimento são recentes, tanto na área rodoviária quanto na aeroportuária. A busca por problemas e estudos similares no tema impacto dinâmico, em obras de infraestrutura como trens em ferrovias, e/ou pontes e normas oferecem também um ponto de partida para o trabalho em questão.

Segundo Brina (1979), no cálculo dos momentos fletores dos trilhos para o dimensionamento das ferrovias, devem ser consideradas as cargas dinâmicas e não estáticas. Decorrente disso, é necessário estabelecer um coeficiente multiplicador para atingir valores próximos às duas situações, chamado de coeficiente dinâmico ou coeficiente de impacto.

Vários pesquisadores estudaram a questão do impacto em ferrovias e estipularam valores para efeito de cálculo que tinham a finalidade de igualar o esforço estático com dinâmico, adotando a pior situação para efeito de cálculo. Estes coeficientes tiveram diversas variáveis desde a forma de aplicação, sendo acrescida uma determinada porcentagem na velocidade ou diretamente na carga estática, valores que variam entre 20% até 320% (BRINA, 1979).

Em 2001, Sánchez realizou um estudo de impacto utilizando elementos finitos para uma análise não linear da colisão de dispositivos de armazenamento de material. Sua idealização foi através da queda de um *container* sobre uma superfície rígida. Segundo Sánchez, este parâmetro pode também ser determinado para outros tipos de estruturas, como o comportamento estrutural de um veículo, componentes do

fenômeno de colisão ou sistemas mecânicos. A análise foi realizada através da capacidade ou habilidade da estrutura de absorver a energia cinética oriunda do impacto, com a finalidade de manter a integridade do espaço ocupado pelos usuários. No caso do impacto provocado pelo pneu de uma aeronave ao colidir com o pavimento aeroportuário, ocorre também este tipo de comportamento, uma vez que devem possuir capacidade de absorver este fenômeno físico de forma adequada, minimizando danos.

A ferramenta utilizada por Sánchez (2001) na simulação e análise numérica (via elementos finitos) ocorreu com uma linguagem computacional própria do *software* ANSYS LS-DYNA (APDL – *ANSYS Parametric Design Language*) através de uma análise dinâmica explícita. Em sua análise, foram realizados três tipos de quedas do *container* em quina, em chapa e em chanfro. Como era esperado pelo autor, a queda em quina proporcionou um maior valor de tensão comparado aos demais, sendo na ordem de 72% de acréscimo, mas que poderia variar com a mudança da geometria do *container*.

Segundo Pravia (2003), os projetos realizados para pontes são feitos utilizando treis tipos estabelecidos nas normas e são tratados como uma carga móvel através da linha de influência, onde são definidos os valores de máximos e mínimos relacionados aos esforços que uma determinada estrutura sofre. O aspecto dinâmico, com relação ao carregamento advindo dos veículos é levado em conta através do coeficiente de impacto dinâmico, que pode variar de pesquisa para pesquisa devido às considerações de estudo. Pravia salienta ainda que a interação da passagem de veículos em pontes e sua resposta de ação devido ao carregamento em movimento, requer uma análise dinâmica quando há vãos que sejam significativos, ou seja, grandes estruturas.

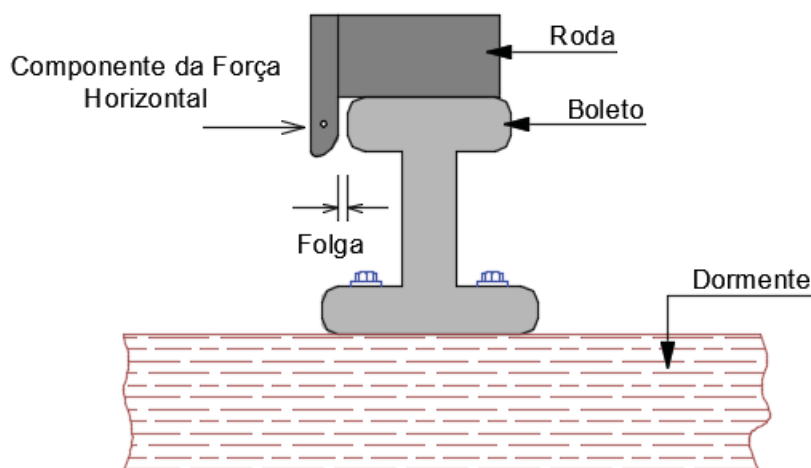
As estruturas de pontes possuem efeitos dinâmicos de maior importância. Nas pontes os efeitos dinâmicos são oriundos da passagem de veículos. Segundo a norma, o dimensionamento de pontes é realizado de forma simplificada, considerando as cargas dinâmicas como cargas estáticas multiplicadas por um coeficiente de impacto para majoração das cargas. Com isso, ocorre um superdimensionamento da estrutura e a desconsideração dos efeitos dinâmicos reais que podem ser provocados (ABECHE, 2015).

De acordo com a Norma Brasileira de Projetos de Pontes de Concreto Armado e Protendido – NBR 7187/2003, o efeito dinâmico oriundo das cargas móveis que

provocam impacto vertical sobre as pontes rodoviárias e ferroviárias deve ser analisado pela teoria da dinâmica das estruturas. No entanto, por tratar-se de uma análise complexa a norma realiza uma simplificação assimilando as cargas móveis às cargas estáticas através de coeficientes multiplicadores, também conhecidos como coeficientes de impacto dinâmico.

De acordo com Marchetti (2008), os efeitos causadores de impacto em pontes são complexos e em decorrência disso, sua determinação é estabelecida por processos experimentais. No entanto, para o dimensionamento de pontes rodoviárias a determinação de coeficientes de impacto é realizada através de parâmetros que relacionam os diferentes tipos de vãos como simplesmente apoiado, com ou sem balanço, e vigas contínuas. Esses coeficientes são inclusos no cálculo do carregamento referente às cargas das pontes para o dimensionamento das vigas. Nas pontes ferroviárias há uma força na direção horizontal que ocasiona impacto lateral devido à folga existente entre o friso da roda do trem e o boleto do trilho, como mostra a FIGURA 4.

FIGURA 4 – IDEALIZAÇÃO DO IMPACTO LATERAL EM PONTES FERROVIÁRIAS.



FONTE: Marchetti (2008).

Este efeito é causado pela oscilação do trem que é considerada agindo de forma natural ao longo do eixo da via férrea. Como critério para cálculo do boleto e dormente é estabelecido um acréscimo de carga em torno de 20% do esforço horizontal representando o impacto.

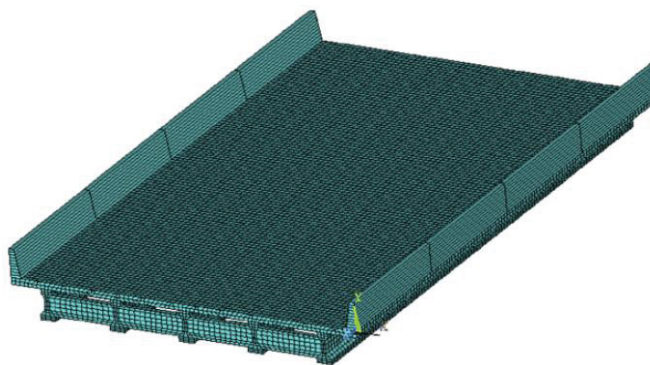
Segundo Deng e Cai (2010) o efeito dinâmico produzido pelo movimento dos veículos em pontes é tratado como um fator de impacto dinâmico em muitos critérios de projeto. Devido à deterioração da superfície de pontes existentes, há estudos que



definem os fatores de impacto calculados em decorrência de medições realizadas em campo. Assim, os valores estabelecidos poderiam ser ainda maiores do que os valores especificados nos projetos, visando a elaboração e execução de novos projetos estruturais.

Deng e Cai (2010) desenvolveram um modelo acoplado, em três dimensões, para simular a interação entre os veículos e uma ponte. O estudo objetivava investigar o fator de impacto dinâmico para pontes de concreto do tipo multi-vigas (FIGURA 5), utilizando o *software* ANSYS. Em sua análise foram considerados os efeitos do comprimento do vão, a velocidade do veículo e as condições da superfície da ponte sobre o fator de impacto. Em resumo, foram sugeridas expressões simples para calcular os fatores de impacto tanto para novos projetos estruturais de pontes quanto para as existentes.

FIGURA 5 – MODELO EM ELEMENTOS FINITOS DE PONTE MULTI-VIGAS.



FONTE: Deng e Cai (2010).

Em 2012, Al-Qadi e Wang investigaram o impacto de pneus de veículos em dois tipos de pavimentos flexíveis para rodovia, variando apenas as espessuras das camadas e os diferentes tipos de contatos dos pneus com o pavimento (sendo pneus de largura pequena com pouca área de contato e pneus largos com maior área de contato). Em sua análise foram consideradas duas situações de ensaios: uma experimental (FIGURAS 6a e 6b) e outra numérica, com elementos finitos.

O estudo de Al-Qadi e Wang (2012), utilizando o MEF, visou a obtenção de dados para comparação de resultados (tais como as tensões de tração, compressão, cisalhamento e as deformações) entre os diferentes pneus. Nesta análise, os pneus com pouca largura (caso de ensaio de uma roda, com pneus mais espessos) apresentaram valores mais elevados, para uma mesma solicitação.

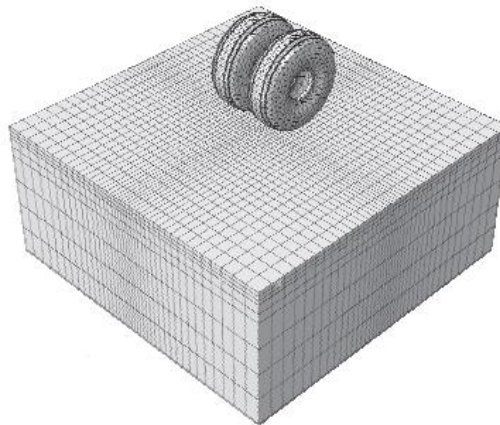
FIGURA 6 – ANÁLISE EXPERIMENTAL DO IMPACTO DE RODAS EM MOVIMENTO (EM TRAFÉGO).



FONTE: Al-Qadi e Wang (2012).

Ainda em 2012, Buonsanti e Leonardi apresentaram um estudo para determinar as tensões de contato, deformações e deslocamentos de pavimentos aeroportuários durante o impacto da aeronave modelo Boeing 737-200<sup>7</sup> no instante do pouso. Um modelo tridimensional foi elaborado utilizando o MEF para a análise do comportamento estrutural de pavimentos flexíveis (FIGURA 7).

FIGURA 7 – MODELO EM ELEMENTOS FINITOS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL E DAS RODAS DA AERONAVE BOEING 737-200.



FONTE: Buonsanti e Leonardi (2012).

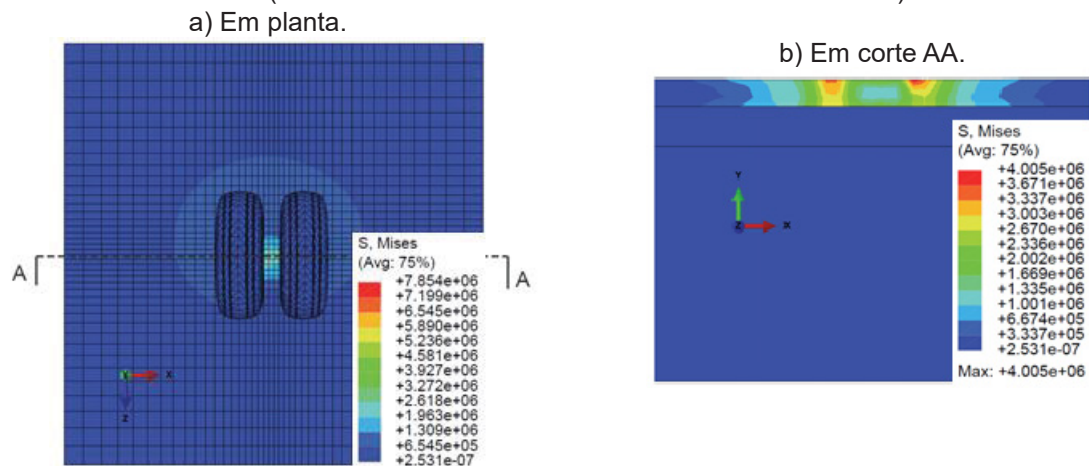
A simulação de Buonsanti e Leonardi (2012) considerou um sistema do trem de pouso principal da aeronave pousando em uma superfície flexível onde foram considerados os dois pneus da aeronave (por simetria nas condições de contorno) em

<sup>7</sup> Segundo a fabricante de aeronaves norte americana Boeing (2016), o modelo 737-200 não é uma AMP, pois é considerada uma aeronave de porte médio a baixo, com capacidade de transportar até 136 passageiros em uma configuração de classe única, e possui um peso máximo bruto aproximadamente entre 53 e 58 toneladas.



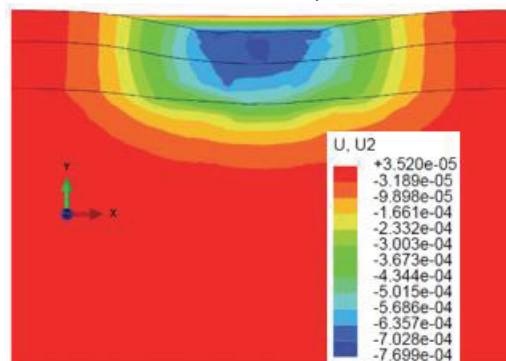
contato com a estrutura do pavimento. A aplicação realizada naquele trabalho levou em consideração as cargas reais e o fenômeno de atrito entre as rodas da aeronave e o pavimento durante o instante da aterrissagem. No trabalho destes pesquisadores, a camada de asfalto foi assumida com um comportamento elástico, e as demais como elastoplástico. As FIGURAS 8 e 9 apresentam os esforços de tensão e deslocamentos verticais da estrutura do pavimento aeroportuário.

FIGURA 8 – ANÁLISE DE TENSÕES DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO EM PLANTA E EM CORTE AA (TENSÕES DE VON MISES: UNIDADE EM PASCAL).



FONTE: Buonsanti e Leonardi (2012).

FIGURA 9 – DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO PAVIMENTO EM CORTE AA (UNIDADE EM METROS).



FONTE: Buonsanti e Leonardi (2012).

Em seu estudo, Buonsanti e Leonardi<sup>8</sup> (2012) notaram que para uma maior compreensão do comportamento estrutural do pavimento, e perceberam que é

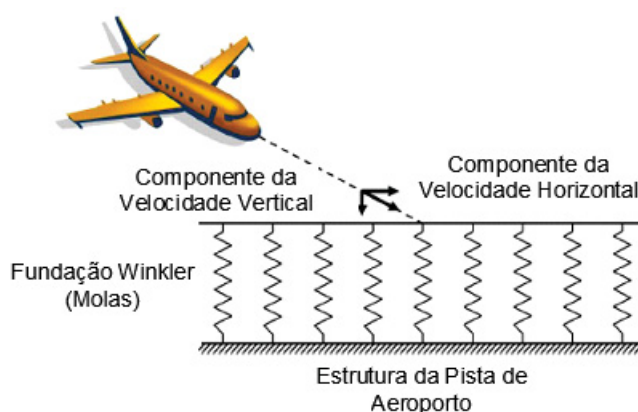
<sup>8</sup> O estudo apresentado por Buonsanti e Leonardi seria um dos trabalhos como referência para calibração do modelo desta pesquisa, no entanto, seu estudo revelou algumas inconsistências, como, inexistência da transferência de tensões de uma camada para outra (FIGURA 8b), dados das características dos pneus equivocados, valores de deflexões iguais para a análise estática e dinâmica, e a não apresentação (consideração) dos parâmetros de amortecimento e rigidez da aeronave.

necessário o avanço de pesquisas que levem em consideração diferentes combinações de variáveis, como: as cargas de roda, tipo e pressão dos pneus e diferentes seções de pavimentos.

Outro estudo que também objetivou estudar os efeitos do impacto de aeronaves sobre pavimentos aeroportuários foi realizado por Yadav e Shukla (2012). Eles estimaram a deflexão causada pela carga da aeronave no instante do pouso em pavimentos com uma fundação em molas em que não foi considerado um revestimento com mistura asfáltica. Apresentaram, para isso, um modelo analítico simples para prever a deflexão de um pavimento aeroportuário no instante do pouso de uma aeronave.

Como parâmetros de análise foram utilizadas características específicas como: componentes das velocidades vertical e horizontal da aeronave, módulo de reação do subleito da pista não pavimentada de solos estabilizados sendo modelado como uma estrutura de apoio do tipo elástico, e a pressão de contato do pneu da aeronave (FIGURA 10).

FIGURA 10 – ATERRISSAGEM DE UMA AERONAVE EM PISTA DE AEROPORTO E IDEALIZAÇÃO DO MODELO PELO MÉTODO DA FUNDAÇÃO DE WINKLER.



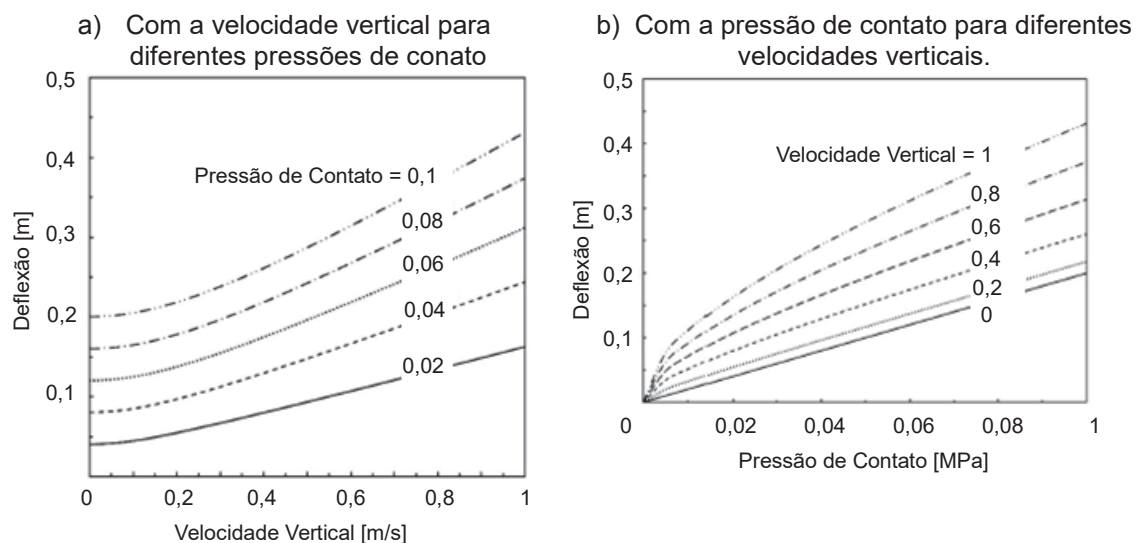
FONTE: Adaptado de Yadav e Shukla (2012).

Yadav e Shukla (2012) propuseram ainda, como estudo adicional, coeficientes de impacto para pistas de aeroportos através das relações de deflexão do pavimento, adotando como critério, a relação entre a análise dinâmica e estática.

Deste modo, os valores de coeficientes de impacto para os pavimentos de pistas de aeroportos foram estabelecidos com base em uma análise adimensional por parte dos três parâmetros empregados, sendo eles: a deflexão, a velocidade vertical e pressão de contato.

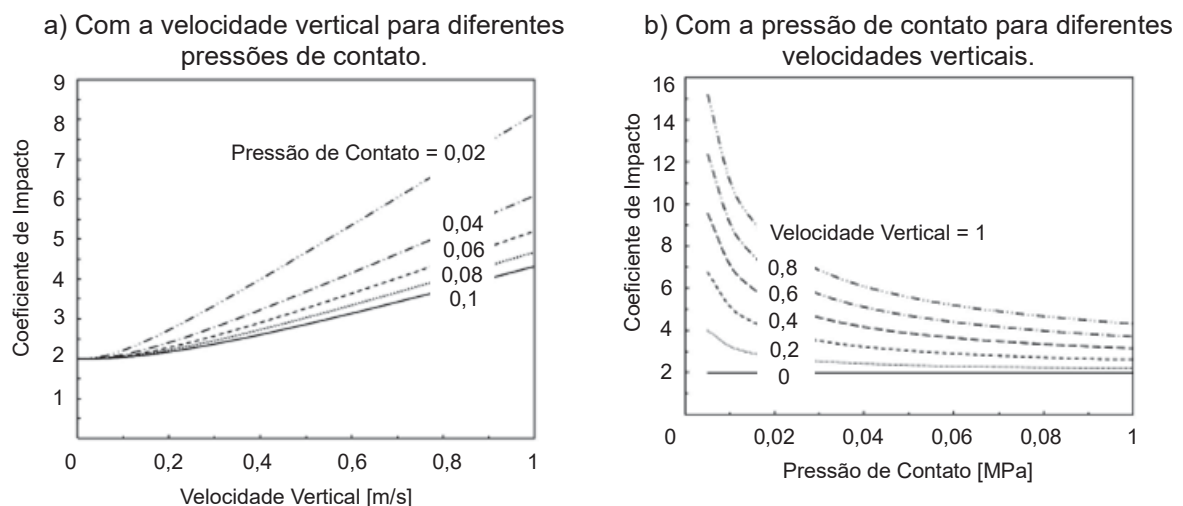
As FIGURAS 11a e 11b mostram a variação da deflexão dinâmica com a velocidade vertical e com a pressão de contato para diferentes valores, na forma adimensional. No entanto, a FIGURAS 12a e 12b mostram a variação do coeficiente de impacto com a velocidade vertical e com a pressão de contato para diferentes valores, na forma adimensional.

FIGURA 11 – VARIAÇÃO DA DEFLEXÃO NA ANÁLISE DE IMPACTO NO POUSO.



FONTE: Adaptado do Yadav e Shukla (2012).

FIGURA 12 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE IMPACTO (ADIMENSIONAL).



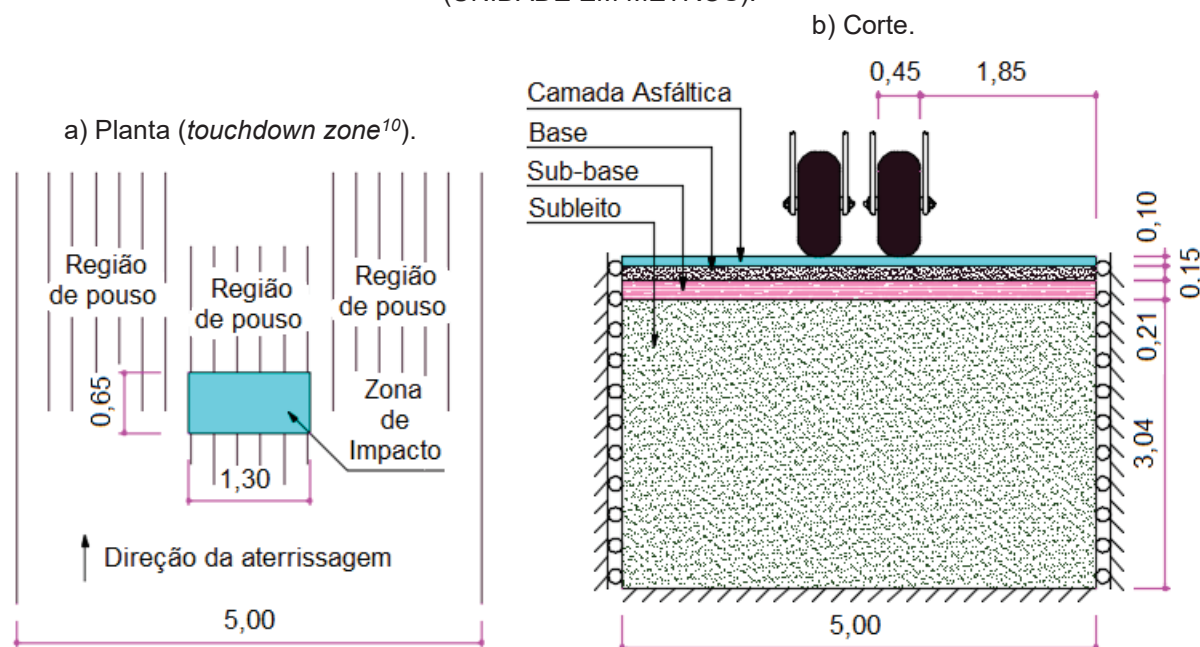
FONTE: Adaptado do Yadav e Shukla (2012).

Neste citado artigo, foi observado que a deflexão dinâmica do pavimento desta pesquisa, cresce de forma não linear com o aumento da velocidade vertical da aeronave para qualquer valor de pressão de contato. A taxa de crescimento obtida foi

ainda maior para maiores valores de velocidade vertical, isso também ocorre com os valores dos coeficientes de impacto. Já com o aumento da pressão de contato, a deflexão dinâmica também aumentou, provocando maiores danos ao pavimento para qualquer velocidade da aeronave.

Posteriormente, Leonardi (2014), apresentou um estudo numérico sobre o impacto da roda (rodagem dupla no trem de pouso principal) de uma aeronave – modelo Airbus A321<sup>9</sup> – sobre uma superfície de pavimento flexível. Sua proposta consistia em simular o comportamento da pista do aeroporto durante o processo de aterrissagem, conforme indicam as FIGURAS 13a e 13b.

FIGURA 13 – ESBOÇO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO SIMULADO, EM PLANTA E EM CORTE (UNIDADE EM METROS).



FONTE: Adaptado de Leonardi (2014).

Leonardi (2014) utilizou o método dos elementos finitos em três dimensões, com o intuito de investigar a resposta do pavimento a ciclos repetidos de cargas (fadiga). O modelo adotado para análise levou em consideração uma estrutura multicamadas, sendo a camada asfáltica assumida com um comportamento

<sup>9</sup> Segundo a fabricante de aeronaves Airbus (2016), o modelo A321 não é uma AMP, pois é considerada uma aeronave de porte médio, com capacidade de transportar até 185 passageiros em uma configuração de classe única, e possui um peso máximo bruto aproximadamente entre 83 e 93 toneladas.

<sup>10</sup> Segundo a FAA (2014), *touchdown zone* é o referido ponto de toque no momento da aterrissagem de uma aeronave.

viscoelastoplástico. O trabalho apresentado por Leonardi (2014) mostrou as respostas do pavimento sem recorrer a experimentos de medições realizados em campos.

Pogorelova, Kozin e Matiushina (2014) analisaram as tensões críticas da capa de gelo causadas pelo processo de pouso e decolagem da aeronave modelo IL-76TD. Em sua análise foram consideradas a influência da espessura do gelo, a profundidade da bacia e a movimentação instável na possibilidade de destruição da capa de gelo, através de uma análise elástico-linear. Os resultados apresentados por estes autores mostraram que as tensões são maiores no processo de decolagem. Com o aumento da espessura da capa de gelo ocorre a diminuição destas tensões. O processo de pouso e decolagem da aeronave modelo IL-76TD mostrou-se seguro quando as tensões máximas forem inferiores às tensões de falha da camada de gelo.

Em 2015, Modarres e Shabani investigaram os efeitos da carga de impacto sobre a propagação de fissuras em pavimentos aeroportuários utilizando a mecânica da fratura. Para estudar os efeitos, foram consideradas as condições de cargas reais de uma aeronave e a não linearidade das camadas de um pavimento flexível, como mostra a TABELA 2.

TABELA 2 – PARÂMETROS DOS MATERIAIS E GEOMETRIA DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO UTILIZADO PARA ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS.

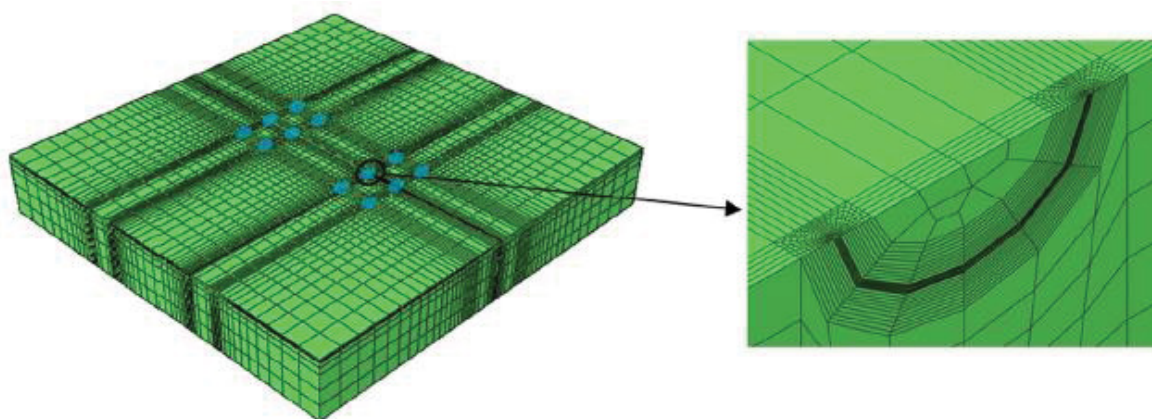
Camadas	Espessuras [mm]	Coefficiente de Poisson	Módulo de Elasticidade [MPa]
Revestimento	120	0,35	2500
			4000
			5500
			7000
Base	200	0,3	190
Sub-base	300	0,3	150
Subleito	2400	0,4	40

FONTE: Adaptado de Modarres e Shabani (2015).

Especificamente, foram estudados os efeitos da componente vertical da velocidade, o coeficiente de atrito do pavimento decorrente do contato do pneu, a profundidade e a posição (direção transversal e longitudinal) das fissuras e, o Módulo Resiliente da mistura asfáltica. Em sua análise, foi considerada a configuração para

um trem de pouso de uma aeronave modelo Boeing 777-300<sup>11</sup>, que tem como massa sobre o trem de pouso principal no momento da aterrissagem de 334 toneladas, ou seja, sendo 95% do seu peso bruto que é de 352 toneladas. Em seu estudo, Modarres e Shabani notaram que os parâmetros mais significativos foram a componente vertical da velocidade e o módulo de elasticidade do asfalto, pois com o aumento desses parâmetros, há um aumento considerável nos fatores da intensidade de tensão e redução no tempo de vida à fadiga do asfalto.

FIGURA 14 – MODELO EM ELEMENTOS FINITOS DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO COMPOSTO PELA CONFIGURAÇÃO DAS RODAS DA AERONAVE BOEING 777-300, NO POUSO.



FONTE: Modarres e Shabani (2015).

Pogorelova, Kozin e Matiushina (2015) analisaram o estado de tensão e deformação na capa de gelo no processo de pouso e decolagem da aeronave modelo IL-76TD. Nessa análise foi utilizado um modelo elástico-linear isotrópico, com a aplicação de carga da aeronave através de uma pressão distribuída variável. O estudo mostrou que as tensões normais dependem da espessura e do módulo de elasticidade da capa de gelo, de modo que diminuindo a espessura desta capa e aumentando o seu módulo de elasticidade, provoca-se um aumento nas tensões. As tensões máximas foram observadas no processo de decolagem. Portanto, observou-se que para um processo de pouso e decolagem seguro da aeronave modelo IL-76TD, a espessura mínima da capa de gelo deve ser de 1 metro.

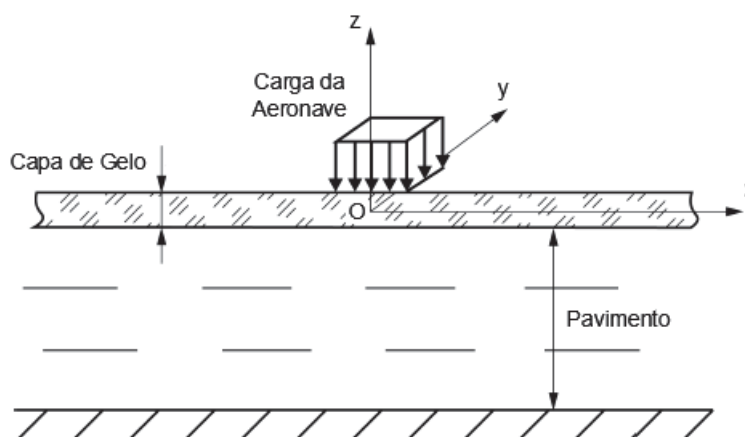
<sup>11</sup> De acordo com a Boeing (2016), o modelo 777-300 é considerada uma aeronave de porte médio a grande, com capacidade de transportar até 550 passageiros em uma configuração de classe única, e possui um peso máximo bruto de aproximadamente 352 toneladas.



Mais recente, Matiushina, Pogorelova e Kozin (2016) analisaram as deflexões da capa de gelo causadas pelas cargas de impacto e de movimento durante o processo de pouso e desaceleração ao longo da pista, das aeronaves modelo IL-76TD e C-130 Hércules. Em sua análise (FIGURA 15) foram consideradas as ações combinadas de cargas e desaceleração, simulando a situação de frenagem até a parada completa da aeronave, que visou estudar a influência da carga no impacto considerando diferentes espessuras do pavimento para identificar condições seguras na pista congelada.

O problema tridimensional do processo de aterrissagem das aeronaves foi realizado através de uma simplificação utilizando o princípio da teoria de ondas lineares das transformadas de Fourier e Laplace.

FIGURA 15 – FORMULAÇÃO DA CARGA DE IMPACTO RETANGULAR SOBRE O PAVIMENTO COBERTO POR UMA CAPA DE GELO.



FONTE: Adaptado de Matiushina, Pogorelova e Kozin (2016).

A solução para este modelo de análise de pavimento com capa de gelo foi definida de forma analítica onde foi constatado que a carga de impacto produz uma deflexão com magnitude menor que a deflexão produzida pela desaceleração ao atingir a velocidade crítica.

Com base na revisão bibliográfica realizada nesta dissertação, na TABELA 3, é apresentado um resumo contendo o autor, o ano de estudo, o tipo de estrutura e as características relacionadas aos parâmetros de análise, com os devidos coeficientes de impacto, conforme considerados, caso a caso.

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES TIPOS DE ESTRUTURAS COM SEUS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE IMPACTO.

Autor	Tipo de Estrutura	Características	Utilização	Coeficiente de Impacto
BRINA (1979)	Ferrovias	Impacto vertical e impacto lateral em ferrovias	Majorar cargas ou velocidades	1,20 a 3,20
NBR 7187 (2003)	Pontes Rodoviárias	Vãos das pontes relacionado ao impacto dinâmico vertical - 10 a 200m	Majorar cargas	1,08 a 1,35
NBR 7187 (2003)	Pontes Ferroviárias	Vãos das pontes relacionado ao impacto dinâmico vertical - 10 a 200m	Majorar cargas	1,20 a 1,43
MARCHETTI (2008)	Pontes Rodoviárias	Vãos das pontes relacionado ao impacto dinâmico vertical - 10 a 200m	Majorar cargas	1,00 a 1,33
MARCHETTI (2008)	Pontes Ferroviárias	Impacto Lateral devido à folga existente entre o friso da roda e o boleto do trilho	Majorar cargas	1,20
YADAV & SHUKLA (2012)	Pistas de Aeroportos	Tensões e deformações no pavimento aeroportuário	Deflexão estática e dinâmica	2,00 a 16,00

FONTE: O autor (2017).

Nesta dissertação, o estudo dos efeitos do impacto das AMP em pistas de aeroportos, pode trazer novas análises e contribuições, uma vez que se diferenciam em alguns aspectos dos demais estudos apresentados.



### 3 ANÁLISE DINÂMICA EXPLÍCITA

Neste capítulo será abordado o conceito de análise dinâmica explícita, o qual será utilizado nos estudos dos casos apresentados no capítulo de metodologia. A análise dinâmica explícita caracteriza um método numérico de integração direta no tempo utilizado pela interface LS-DYNA do *software* ANSYS para a solução dos problemas propostos nesta dissertação (MENDES, 2012).

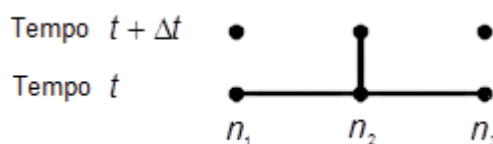
Os métodos de integração direta no tempo são utilizados em diversos problemas práticos de engenharia, e são divididos em dois grupos: os métodos implícitos e os métodos explícitos (TOLEDO, 1983).

A resolução numérica de problemas dinâmicos é correspondente à integração no tempo da equação diferencial de equilíbrio dinâmico do problema de valores iniciais (formulação clássica) e pode ser efetuada em coordenadas nodais (usando de uma análise modal) ou em coordenadas estruturais (usando de uma análise histórico-temporal) (MENDES, 2012).

Entre os métodos de integração direta mais difundidos estão os Métodos de Newmark, caracterizado como implícito, e o Método da Diferença Central, caracterizado como explícito (TOLEDO, 1983).

O método explícito refere-se ao método numérico (Método da Diferença Central) usado para representar e resolver as derivadas temporais nas equações de movimento e energia. O *software* ANSYS LS-DYNA utiliza este método para as análises numéricas computacionais de dinâmica explícita (HALLQUIST, 1998). A FIGURA 16 apresenta uma descrição gráfica da integração explícita no tempo.

FIGURA 16 – DESCRIÇÃO GRÁFICA DA INTEGRAÇÃO EXPLÍCITA NO TEMPO.



FONTE: Adaptado do Hallquist (2002).

O deslocamento do nó  $n_2$  no nível de tempo  $t + \Delta t$  é igual aos valores conhecidos de deslocamento nos nós  $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$  no nível de tempo  $t$ . Um sistema de equações algébricas é escrito para todos os nós da malha no nível de tempo  $t + \Delta t$ .

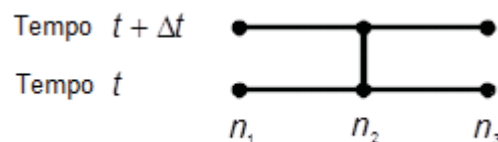
Cada equação é resolvida por sua vez para os deslocamentos de pontos de nós desconhecidos. Com isso, os métodos explícitos apresentam rapidez nas resoluções computacionais e são condicionalmente estáveis. Isto significa que, o intervalo de tempo  $\Delta t$  deve ser menor que um valor crítico ou os erros computacionais crescerão, resultando em uma solução insatisfatória, ou seja, o tamanho do intervalo de tempo é limitado e pode apresentar caráter divergente caso um passo de tempo muito grande seja utilizado. Portanto, o intervalo de tempo  $\Delta t$  (*time step*) deve ser menor que o tempo que leva um sinal viajando na velocidade do som ( $c$ ) no material para percorrer a distância entre os pontos do nó  $\Delta x$ , como mostra a equação (1) (HALLQUIST, 2002; TORII, 2012). Valores limites para o tamanho do passo de tempo a ser utilizado para os métodos explícitos são também apresentados por Hughes (1987), Chopra (1995) e Bathe (1996).

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c} = \frac{\Delta x}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (1)$$

onde,  $E$  e  $\rho$  são os respectivos módulo de elasticidade e densidade do material. Porém, por segurança o ANSYS LS-DYNA considera um valor padrão equivalente a 90% deste valor (HALLQUIST, 2002).

Assim como o método explícito, o método implícito também refere-se ao método numérico (Método de Newmark) usado para representar e resolver as derivadas temporais nas equações de movimento e energia. No entanto, existe diferença, como mostra a FIGURA 17.

FIGURA 17 – DESCRIÇÃO GRÁFICA DA INTEGRAÇÃO IMPLÍCITA NO TEMPO.



FONTE: Adaptado do Hallquist (2002).

O deslocamento do nó  $n_2$  no nível de tempo  $t + \Delta t$  é igual a valores conhecidos do deslocamento nos nós  $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$  no nível de tempo  $t$ , e também os deslocamentos desconhecidos dos nós  $n_1$  e  $n_3$  no nível de tempo  $t + \Delta t$ . Isto resulta num sistema de equações algébricas simultâneas que são resolvidas usando álgebra matricial como, por exemplo, inversão de matriz. A vantagem dessa abordagem é que ela é incondicionalmente estável, ou seja, não há tamanho de etapa de tempo crítico. A desvantagem é o esforço computacional necessário para formar, armazenar e inverter o sistema de equações. Simulações implícitas normalmente envolvem um número relativamente pequeno de etapas de tempo para que o cálculo não se torne computacionalmente inviável (HALLQUIST, 2002).

Em resumo, no método explícito, as aproximações temporais para um tempo  $t$  são obtidas considerando o equilíbrio em um tempo  $t - 1$ , ou seja, a equação é avaliada no antigo intervalo de tempo  $t_n$ , enquanto que nos métodos implícitos utiliza-se a equação de movimento avaliada no novo intervalo de tempo  $t_{n+1}$ . Isto permite uma redução no esforço computacional por passo de tempo, principalmente quando algumas simplificações são introduzidas, como a utilização de matrizes de massa e amortecimento agrupadas, ou seja, diagonais, as equações se desacoplam, resultando num algoritmo explícito (SÁNCHEZ, 2001; TORII, 2012; HALLQUIST, 2002).

Segundo Bathe (1996), a formulação clássica utilizada para solução de problemas dinâmicos é definida como a equação do movimento, como mostrado na equação (2):

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\} \quad (2)$$

onde  $[M]$ ,  $[C]$  e  $[K]$  são as respectivas matrizes de massa, amortecimento e rigidez; e,  $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$ ,  $\{u\}$  e  $\{F^a\}$  são os respectivos vetores de aceleração, velocidade, deslocamento e forças aplicadas. A integração no tempo é realizada por passos de tempo que, tomando como exemplo a velocidade  $\dot{u}$ , transformam-se em incrementos de deslocamentos  $\Delta u$ , como mostra a equação (3) (HALLQUIST, 1998).

$$\dot{u} = \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (3)$$

No geral, os fenômenos de contato são resolvidos por incrementos de deslocamentos, onde a cada passo de integração no tempo encontra-se o incremento de deslocamento que é utilizado para calcular o contato, e a seguir as deformações e tensões (HALLQUIST, 1998). Assim, a integração no tempo nos fornece vários dados, como:

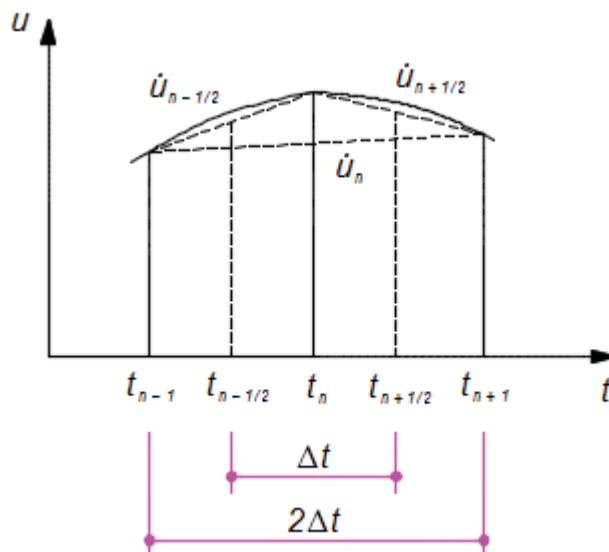
$$\Delta t, \quad u, \quad \dot{u} = \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad \text{e} \quad \ddot{u} = \frac{\Delta \dot{u}}{\Delta t} \quad (4)$$

Com a integração no tempo pelo Método da Diferença Central (FIGURA 18), as respectivas acelerações  $\{\ddot{u}\}$  e velocidades  $\{\dot{u}\}$  da equação do movimento, no instante  $t_n$ , podem ser escritas da seguinte forma (HALLQUIST, 1998; HALLQUIST, 2002):

$$\{\ddot{u}\} = \frac{1}{(\Delta t)^2} \{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}\} \quad (5)$$

$$\{\dot{u}\} = \frac{1}{2\Delta t} \{u_{n+1} - u_{n-1}\} \quad (6)$$

FIGURA 18 – MÉTODO DA DIFERENÇA CENTRAL UTILIZADO PELO ANSYS LS-DYNA.



FONTE: Adaptado do ANSYS (2017).

onde,  $\Delta t$  é o incremento de tempo ou intervalo dividido no instante próximo  $u_{n+1}$ , atual  $u_n$  e anterior  $u_{n-1}$ . Ao substituir as equações (5) e (6) na equação (2), tem-se:

$$[M]\left\{\frac{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}}{(\Delta t)^2}\right\} + [C]\left\{\frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2\Delta t}\right\} + [K]\{u\} = \{F^a\} \quad (7)$$

que rearranjando obtemos a equação (8):

$$\left[ [M] + \frac{\Delta t}{2} [C] \right] u_{n+1} = \left\{ (\Delta t)^2 (-[K]\{u_n\} + [F]) + 2[M]\{u_n\} - \left( [M] - \frac{\Delta t}{2} [C] \right) u_{n-1} \right\} \quad (8)$$

Portanto, o lado esquerdo da equação (8) contempla a incógnita a ser obtida no próximo instante  $u_{n+1}$ , uma vez que, os demais termos do lado direito desta equação são todos conhecidos. Se as matrizes de massa  $[M]$  e de amortecimento  $[C]$  são diagonais, equações (9) e (10), a inversão destas torna-se uma solução trivial para a equação (8) (ANSYS, 2017).

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & 0 \\ & & \dots & \\ & 0 & & \dots \\ & & & & m_n \end{bmatrix} \quad M^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1} & & & \\ & \frac{1}{m_2} & & 0 \\ & & \dots & \\ & 0 & & \dots \\ & & & & \frac{1}{m_n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & & & \\ & c_2 & & 0 \\ & & \dots & \\ & 0 & & \dots \\ & & & & c_n \end{bmatrix} \quad C^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_1} & & & \\ & \frac{1}{c_2} & & 0 \\ & & \dots & \\ & 0 & & \dots \\ & & & & \frac{1}{c_n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Contudo, o deslocamento no instante  $t_n + \Delta t$  é dado de acordo com os deslocamentos nos instantes anterior  $t_n - \Delta t$  e atual  $t_n$ . Decorrente disso, é necessária a determinação de um algoritmo inicial para solução do problema. Para  $t = 0$  tem-se condições iniciais  $u_0$ , que resulta na aceleração  $\ddot{u}_0$ , como mostra a equação (11).

$$u_{-1} = u_0 - \Delta t \dot{u}_0 + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{u}_0 \quad (11)$$

Em resumo, o método explícito (Método da Diferença Central) define as acelerações no tempo  $t$  como:

$$\{\ddot{u}_n\} = [M]^{-1} (\{F_n^{ext}\} - \{F_n^{int}\}) \quad (12)$$

onde,  $F_n^{ext}$  e  $F_n^{int}$  são os respectivos vetores de forças externas e internas. E com as acelerações em um tempo  $t_n$  determinadas, as velocidades no tempo  $t_{n+1}$  são então encontradas pela equação (13):

$$\{\dot{u}_{n+1/2}\} = \{\dot{u}_{n-1/2} + \Delta t \ddot{u}_n\} \quad (13)$$

com a qual, após sua integração, obtém-se os deslocamentos, como mostra a equação (14):

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n + \Delta t \dot{u}_{n+1/2}\} \quad (14)$$

Entretanto, para problemas não-lineares, algumas considerações necessitam ser definidas como:

- É necessário definir uma matriz de massa concentrada para uma inversão simples;
- As equações tornam-se desacopladas e podem ser resolvidas diretamente de forma explícita;

- Nenhuma inversão da matriz de rigidez é necessária, pois todas as não-linearidades, incluindo as de contato, estão inclusas no vetor de forças interna; onde, o maior esforço computacional encontra-se no cálculo das forças internas;
- Não é necessário nenhuma verificação de convergência para uma análise não linear, pois as equações são desacopladas;
- Os passos de tempo muito pequenos são necessários para manter o limite de estabilidade (ANSYS, 2017).

Para efeito de comparação, a TABELA 4 apresenta as vantagens e desvantagens dos métodos de integração direta explícito e implícito.

TABELA 4 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DIRETA EXPLÍCITO E IMPLÍCITO.

	Método de integração direta explícito	Método de integração direta implícito
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Algoritmo robusto e mais simples de programar</li> <li>- Mais rápido e requer menos memória em sua resolução</li> <li>- Apresenta bom desempenho para instabilidade de rigidez</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incondicionalmente convergente</li> <li>- A solução é a natural e completa do problema</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Algoritmo é condicionalmente convergente</li> <li>- Passos extremamente pequenos são necessários</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utiliza mais recursos computacionais</li> <li>- Mais lento</li> <li>- Mais sensível quanto à instabilidade em situações especiais</li> </ul>

FONTE: Adaptado do Hallquist (2002).

Assim, a análise dinâmica explícita é usada para determinar a resposta dinâmica de uma determinada estrutura devido à propagação de ondas de tensão, impacto ou cargas dependentes do tempo. Este tipo de análise é também utilizado para modelar fenômenos mecânicos altamente não-lineares (HALLQUIST, 2002).

### 3.1 ANÁLISE NÃO LINEAR

A simulação de impacto e colisão de sólidos é uma característica que deve ser levada em consideração devido ao comportamento não-linear do fenômeno (SÁNCHEZ, 2001). Existem várias causas deste fenômeno tão complexo, como: plasticidade, grandes deslocamentos, grandes rotações, deformações não infinitesimais e os efeitos derivados do contato e atrito entre corpos. Essas não-linearidades podem ser agrupadas em três categorias: comportamento não-linear do tipo cinemático, comportamento não-linear do tipo constitutivo e de caráter não-linear das condições de contorno (BATHE, 1996).

A análise não-linear de estruturas é utilizada em diversas áreas da engenharia, sendo mais comum em problemas de impacto, problemas com grande deslocamentos e interações de meios (TOLEDO, 1983; BATHE, 1996; HALLQUIST, 2002).

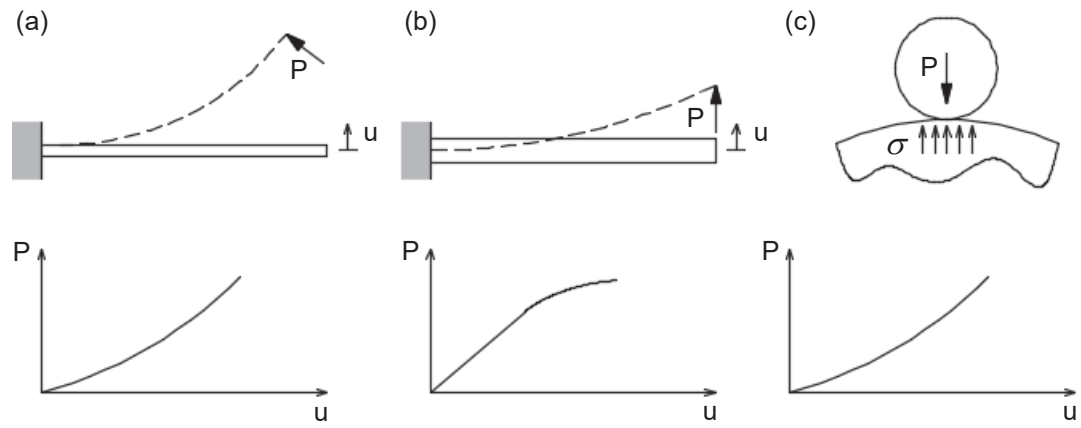
Segundo Cook (1995), a não-linearidade pode ser vista de diversas formas, como:

- Não-linearidade geométrica: ocorre, por exemplo com uma viga engastada, quando as deformações são grandes o suficiente para alterar de forma significativa o modo com que a carga é aplicada ou o modo com que a carga é resistida pela estrutura (FIGURA 19a);
- Não-linearidade de material: ocorre, por exemplo com uma viga engastada, quando a carga aplicada à estrutura gera tensões acima do limite de escoamento do material e após o descarregamento a estrutura apresenta deformação permanente (FIGURA 19b);
- Não-linearidade de contato: em problemas práticos, duas estruturas (ou duas partes de uma mesma estrutura) entram em contato quando o espaço entre elas deixa de existir, se separam após estarem em contato ou podem deslizar uma sobre a outra com ou sem atrito (FIGURA 19c).

A complexidade do processo de não-linearidade requer o auxílio de algoritmos numéricos sofisticados e recursos computacionais poderosos (SÁNCHEZ, 2001). As não linearidades, incluindo o contato, estão incluídas no vetor de forças internas (HALLQUIST, 2002).



FIGURA 19 – EXEMPLOS COMUNS DE COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR.



FONTE: Adaptado do Cook (1995).

TABELA 5 – ALGUNS TIPOS DE NÃO LINEARIDADES ESTABELECIDOS.

Tipos	Descrição
Materiais	Hiperelasticidade, plasticidade, falha de material
Contato	Colisões e impactos de alta velocidade
Deformação Geométrica	Flambagem e colapso

FONTE: Adaptado do Bathe (1996).

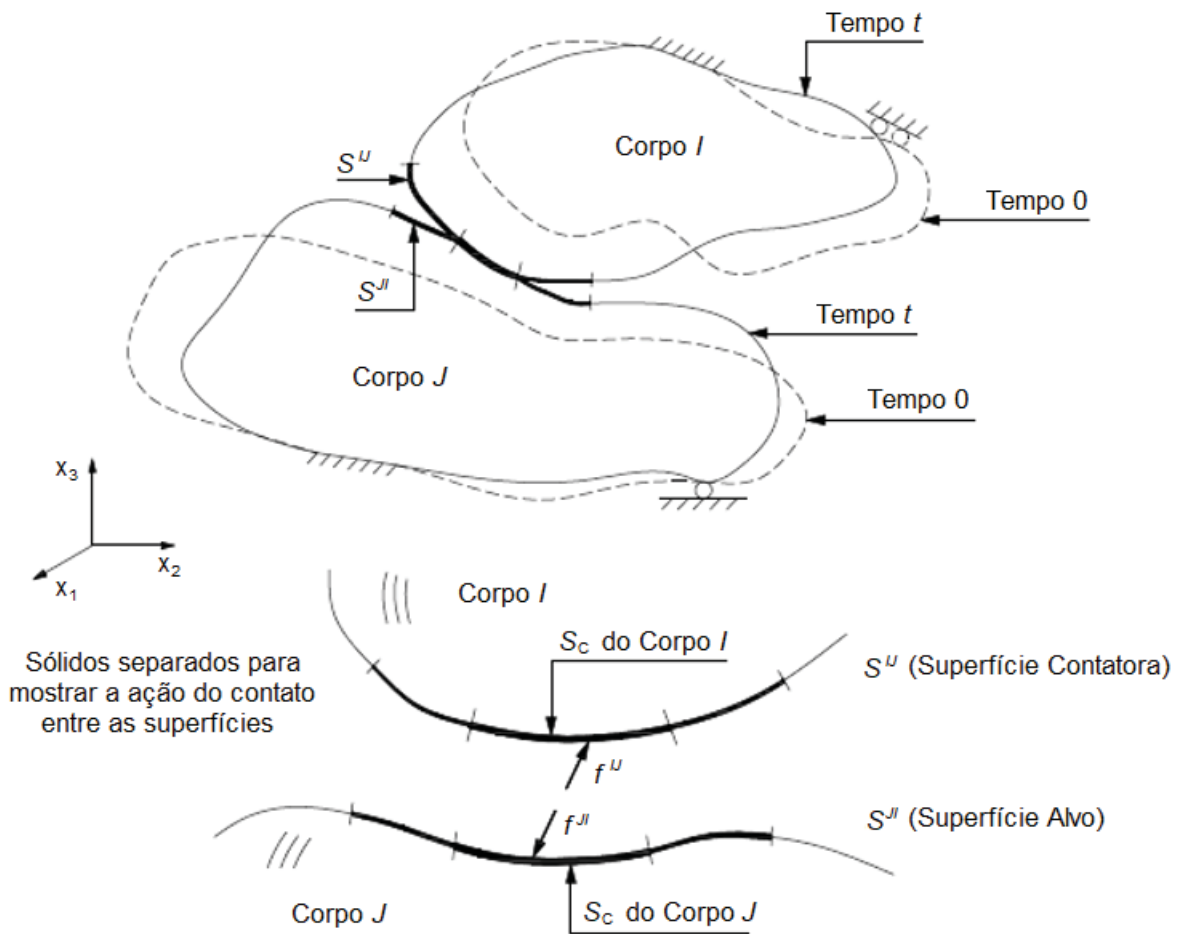
3.2 CONTATO

Os fenômenos de impacto e colisão são designados como altamente não-lineares. A não-linearidade pode ser geométrica, de material ou de condições de contorno. O contato provocado por dois ou mais sólidos resulta num comportamento não-linear difícil de analisar. Esse tipo de problema envolve desde o contato sem atrito com pequenos deslocamentos, até o contato com atrito em condições de grandes deformações inelásticas. No entanto, a formulação das condições de contato é a mesma em todos estes casos, e ainda assim, a solução de problemas não-lineares pode, em algumas análises, ser mais difícil do que em outras, apresentando problemas de convergência (BATHE, 1996). A seguir, será apresentada integralmente uma abordagem geral das condições de contato no contexto de uma análise por elementos finitos, extraído de Bathe (1996).

Considerando  $N$  corpos em contato no tempo  $t$  e  $S_C$  a área completa de contato para cada corpo  $L$  (sendo  $L = 1, \dots, N$ ), o princípio dos trabalhos virtuais para  $N$  corpos (FIGURA 20), em um determinado tempo  $t$  é dado pela seguinte equação:

$$\sum_{L=1}^N \left( \int_V \tau_{ij} \delta_t \mathbf{e}_{ij} dV \right) = \sum_{L=1}^N \left( \int_V \delta u_i f_i^B dV + \int_{S_f} \delta u_i^s f_i^s dS \right) + \sum_{L=1}^N \int_{S_C} \delta u_i^c f_i^c dS \quad (15)$$

FIGURA 20 – SÓLIDOS EM CONTATO NO INSTANTE  $t$ .



FONTE: Adaptado de Bathe (1996).

Na equação, as parcelas dentro dos parênteses correspondem aos termos usuais (tensões, deformações, deslocamentos e forças), e a parcela situada fora dos parênteses corresponde à contribuição das forças de contato. Essas forças de contato são uma contribuição externa, tratada como uma aplicação de forças sobre a superfície de contato. A componente  $f^{IJ}$  é definida como um vetor, contendo as forças

devido ao contato no corpo  $I$ , causado pelo corpo  $J$ , e  $\mathbf{f}^{IJ} = -\mathbf{f}^{JI}$ . O trabalho virtual devido às forças de contato pode ser obtido conforme a equação (16):

$$\int_{S^U} \delta \mathbf{u}_i^I \mathbf{f}_i^{IJ} dS^{IJ} + \int_{S^{JI}} \delta \mathbf{u}_i^J \mathbf{f}_i^{JI} dS^{JI} = \int_{S^U} \delta \mathbf{u}_i^{IJ} \mathbf{f}_i^{IJ} dS^{IJ} \quad (16)$$

As componentes  $\delta \mathbf{u}_i^{IJ}$  e  $\delta \mathbf{u}_i^{JI}$ , são referentes ao deslocamento virtual sobre as superfícies de contato dos corpos  $I$  e  $J$ , como:

$$\delta \mathbf{u}_i^{IJ} = \delta \mathbf{u}_i^I - \delta \mathbf{u}_i^J \quad (17)$$

As superfícies  $S^{IJ}$  e  $S^{JI}$  são denotadas como “par de superfícies de contato”, no entanto, estas não possuem necessariamente o mesmo tamanho. A área de contato no momento  $t$  para os corpos  $I$  e  $J$ , é  $S_C$ . Em cada caso, essa área de contato é parte de  $S^{IJ}$ , que é definida como “superfície contatora”, e  $S^{JI}$  como “superfície alvo”. Portanto, o lado direito da equação (16) pode ser interpretado como o trabalho virtual que as forças de contato produzem sobre o deslocamento virtual relativo do par de superfícies que estão em contato.

Analisando o lado direito dessa equação, observa-se um vetor unitário externo normal à superfície  $S^{IJ}$ . Esse vetor forma uma base vetorial, e é definido como  $\mathbf{n}$ . Decompondo as forças de contato  $\mathbf{f}^{IJ}$  que atuam nessa superfície, em componentes normal e tangencial, como as correspondentes  $\mathbf{n}$  e  $\mathbf{s}$  (representados na FIGURA 21), obtém-se:

$$\mathbf{f}^{IJ} = \lambda \mathbf{n} + \gamma \mathbf{s} \quad (18)$$

onde  $\lambda$  e  $\gamma$  são as respectivas componentes das forças normal e tangencial, como mostram as equações (19) e (20):

$$\lambda = (\mathbf{f}^{IJ})^T \mathbf{n} \quad (19)$$

$$\gamma = (f^{IJ})^T s \quad (20)$$

No entanto, para definir os valores reais para  $n$  e  $s$  utilizados nos cálculos de contato, é considerado um ponto genérico  $x$  à superfície  $S^{IJ}$ , sendo a função  $y^*(x,t)$ , onde a distância de  $x$  para  $S^{IJ}$  é dada por:

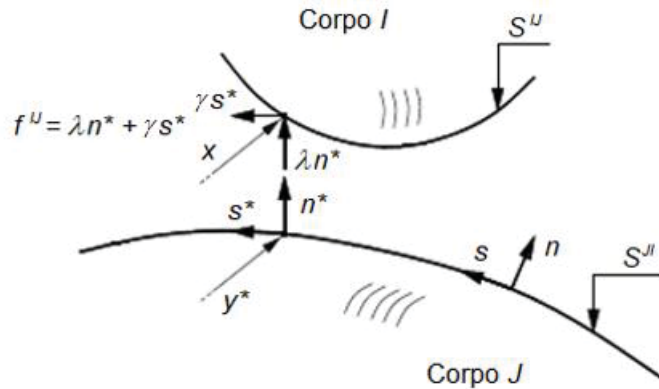
$$g(x,t) = (x - y^*)^T n^* \quad (21)$$

sendo  $n^*$  o vetor unitário normal utilizado em  $y^*(x,t)$ ,  $n^*$  e  $s^*$  correspondem ao ponto  $x$ . Para o par de superfície de contato, a função de distância é a  $g$ . Com estas condições definidas, o contato pode ser escrito como:

$$g \geq 0, \lambda \geq 0 \text{ e } g\lambda = 0 \quad (22)$$

sendo que, a última equação expressa o fato de que se  $g > 0$ , têm-se então  $\lambda = 0$ , e vice-versa.

FIGURA 21 – DEFINIÇÕES USADAS EM ANÁLISE DE CONTATO.



FONTE: Adaptado do Bathe (1996).

### 3.3 CONTATOS NO ANSYS

Determinar o contato entre as componentes de um modelo estrutural pode ser extremamente difícil, devido à grande deformação que normalmente ocorre em uma análise dinâmica. A fim de caracterizar adequadamente a interação entre as superfícies em uma análise dinâmica, o ANSYS disponibiliza vinte e quatro tipos

diferentes de contato, que são classificados em três modos: superfície simples, nós com superfície e superfície com superfície (TABELA 6).

O contato de superfície simples é estabelecido quando uma superfície de um corpo entra em contato consigo mesmo, ou com a superfície de outro corpo. Neste tipo de contato, dito mais simples, o *software* determina automaticamente as superfícies contatora e alvo. No entanto, a maioria das análises de impacto requer a definição das respectivas superfícies.

TABELA 6 – TIPOS DE CONTATO DO ANSYS/LS-DYNA.

	Superfície simples	Nós com superfície	Superfície com superfície
Geral (normal)	SS	NTS	STS e OSTs
Automático	ASSC, AG e ASS2D	ANTS	ASTS
Rígido		RNTR	ROTR
Tied		TDNS	TDSS e TSES
Tiedbreak		TNTS	TSTS
Eroding	ESS	ENTS	ESTS
Edge	SE		
Drawbead		DRAWBEAD	
Forming		FNTS	FSTS e FOSS

FONTE: Adaptado do ANSYS (2009).

O contato de nós com superfície, é estabelecido quando um nó contator penetra uma superfície alvo, sendo comumente utilizado para um contato entre duas superfícies.

No contato superfície com superfície, deve ser definido o momento em que a superfície de um corpo penetra a superfície de outro corpo. Em geral, o contato de superfície com superfície é o tipo de contato mais utilizado para corpos que têm formas arbitrárias, com áreas de contato relativamente grandes.

Neste trabalho, o contato disponível que melhor atende a análise de impacto sem a penetração de uma superfície contatora com uma superfície alvo, é o contato geral normal (ASSC).

No Apêndice A é apresentada uma descrição mais detalhada das opções de contato do programa ANSYS com as definições de cada item apresentado na TABELA 6.

## 4 METODOLOGIA

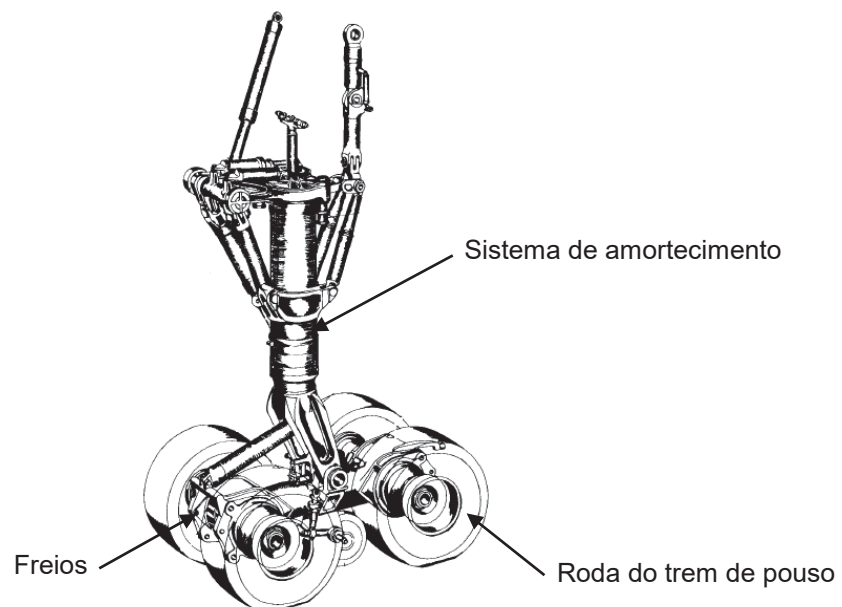
O presente capítulo apresenta a metodologia utilizada neste trabalho, incluindo as hipóteses assumidas, bem como as limitações, e também as características técnicas em termos das aeronaves, do pavimento aeroportuário e da modelagem computacional realizada.

### 4.1 AERONAVES

As características das aeronaves são fundamentais no planejamento e projeto dos aeroportos. Esses dados, fornecidos pelas empresas aéreas influenciam nas instalações aeroportuárias, nos sistemas operacionais, aspectos arquitetônicos e na engenharia.

Na área de pavimentos aeroportuários são as características do trem de pouso principal da aeronave (FIGURA 22), que transmite as solicitações para que possa ser analisado o comportamento estrutural dos pavimentos das pistas de aeroportos.

FIGURA 22 – DETALHE DO TREM DE POUSO PRINCIPAL DA AERONAVE NORTE AMERICANA XB-70 VALKYRIE, UMA DAS DUAS PERNAS.



FONTE: NASA (1968).

O trem de pouso de uma aeronave, também conhecido como trem de aterrissagem, é uma combinação de molas e amortecedores que são utilizados para

suportar as cargas impostas pelas aeronaves quando não estão voando. Suas principais funções, além de taxiar a aeronave e permitir sua decolagem, é promover a absorção de impacto no momento do pouso (FAA, 2009; BOEING, 2016).

Para o desenvolvimento dessa pesquisa, foram considerados quatro tipos diferentes de aeronaves comerciais de duas empresas fabricantes distintas, sendo elas: Airbus A380, Airbus A340-600, Boeing 747-8 e Boeing 777-300. Cada aeronave possui uma determinada carga decorrente de sua forma geométrica e capacidade, e a configuração do trem de pouso é específica para cada tipo de aeronave, assumindo uma melhor distribuição de rodas.

Segundo Barros e Wiransighe (2002), as duas empresas fabricantes de AMP são as mais famosas em atividade, sendo, a Airbus e a norte americana Boeing. Estes pesquisadores consideram como AMP os seguintes modelos: Airbus A380-800, Airbus A380-900, Boeing 747X Stretch e Boeing NLA (*New Large Aircraft*). Para eles, o conceito de AMP é com base nas dimensões, que excedem às das aeronaves correntes, e requer aeródromo com classificação 4F (envergadura de 65 até 80 metros) para o código de referência da pista. No entanto, enquanto que as aeronaves da Airbus estão em atividade desde 2005, as aeronaves da Boeing não iniciaram sua fabricação (Airbus, 2016; Boeing, 2016).

Na presente dissertação, as aeronaves A380, A340-600, 747-8 e 777-300 foram escolhidas devido a serem as maiores no transporte de passageiros voando comercialmente hoje em dia, além de apresentarem valores mais elevados no peso, durante o pouso. As aeronaves consideradas neste estudo contemplam características específicas para análise no instante da aterrissagem, como velocidade de pouso, pressão de contato entre os pneus do trem de pouso principal e a pista do aeroporto, peso bruto máximo de pouso e decolagem, geometria do carregamento (referente à geometria dos trens de pouso) e peso máximo da aeronave com nível de combustível máximo. Na descrição a seguir, são apresentadas as principais características de cada aeronave considerada neste estudo.

#### 4.1.1 Airbus A380

Segundo a fabricante de aeronaves Airbus (2016), o modelo A380 é o maior avião de passageiros em atividade no mundo, com capacidade de transportar até 544 passageiros em uma configuração de quatro classes executivas, e até 853

passageiros em uma configuração de classe única atingindo um alcance máximo de 15200 km de distância. Suas dimensões são de 72,72 metros de comprimento, envergadura de 79,75 metros e altura máxima de 24,09 metros da parte mais alta da cauda, como mostram as FIGURAS 23a e 23b. Enquadra-se, portanto, na categoria das AMP.

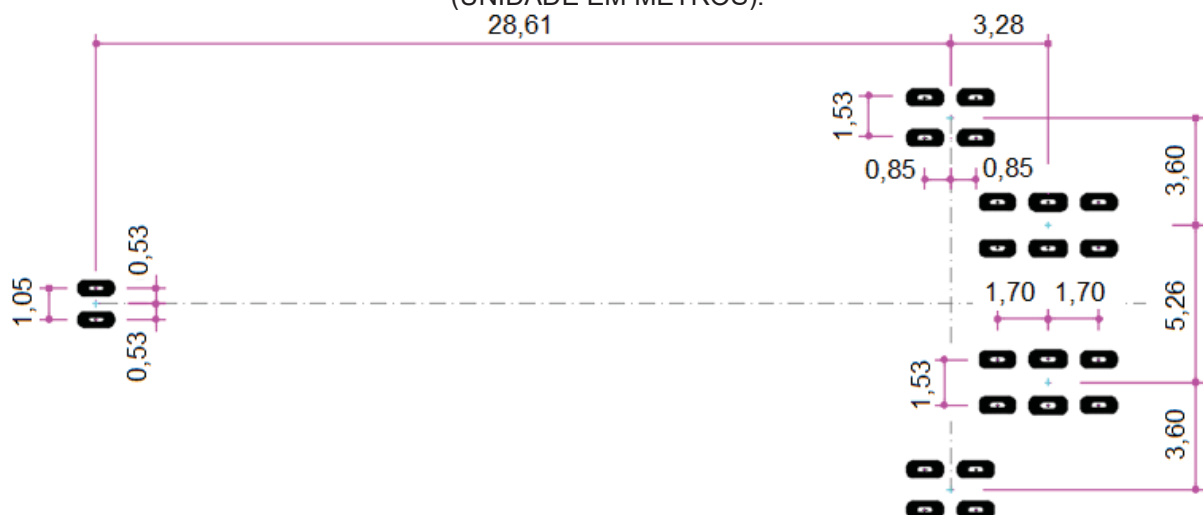
FIGURA 23 – COMPRIMENTO, ENVERGADURA E ALTURA DA AERONAVE AIRBUS A380 (UNIDADE EM METROS).



FONTE: Adaptado da Airbus (2017)

A A380 com nível de combustível completo, tem capacidade para aproximadamente 320 mil litros de volume de carga, e carregada com a capacidade máxima de passageiros, pode atingir até 575 toneladas de peso (parada ou no instante da decolagem). No momento da aterrissagem o Airbus A380 deve estar com carga aproximada de 394 toneladas, devido às forças de sustentação e o gasto de combustível na viagem (FAARFIELD, 2018; AIRBUS, 2017). A FIGURA 24 apresenta a configuração referentes ao trem de pouso principal e de nariz.

FIGURA 24 – CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL E DE NARIZ DO AIRBUS A380 (UNIDADE EM METROS).



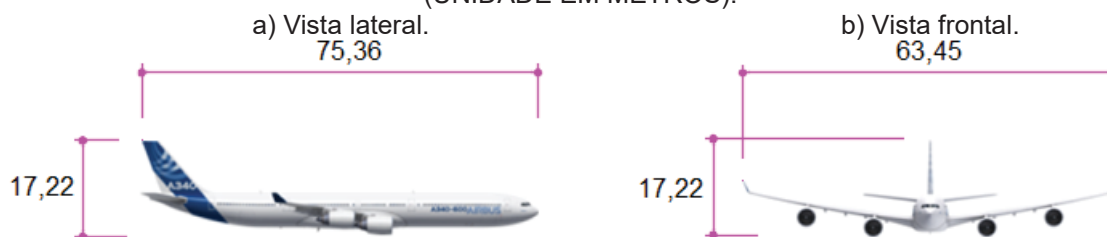
FONTE: Airbus (2017).



#### 4.1.2 Airbus A340-600

A classe de aeronaves Airbus A340 é uma família composta por quatro diferentes modelos: A340-200, A340-300, A340-500 e A340-600. Esses aviões que estão em atividade no mundo todo, e não são mais fabricados pela empresa aérea, porém, são altamente confiáveis e se destacam fortemente pelos aspectos de durabilidade e qualidade. A A340-600 é a maior aeronave desta família, possuindo uma capacidade de transportar até 475 passageiros e um alcance máximo de até 14450 km de distância. Suas dimensões são compostas por um comprimento de 75,36 metros, envergadura de 63,45 metros e altura máxima de 17,22 metros da parte mais alta da cauda, como mostram as FIGURAS 25a e 25b (AIRBUS, 2017).

FIGURA 25 – COMPRIMENTO, ENVERGADURA E ALTURA DA AERONAVE AIRBUS A340-600 (UNIDADE EM METROS).



FONTE: Adaptado da Airbus (2017).

Essa aeronave, com nível de combustível máximo de 204,5 mil litros e carregada com sua capacidade total de passageiros, pode atingir até 381,2 toneladas de peso (parada ou no instante da decolagem). Porém, no momento de aterrissagem o Airbus A340-600 deve pesar no máximo 265 toneladas. Sua configuração de trem de pouso principal e de nariz é mostrada na FIGURA 26 (FAARFIELD, 2018; AIRBUS, 2017).

FIGURA 26 – CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL E SECUNDÁRIO DO AIRBUS A340-600 (UNIDADE EM METROS).



FONTE: Airbus (2017)

#### 4.1.3 Boeing 747-8

A fabricante de aeronaves norte-americana Boeing é uma das maiores em atividade, junto à Airbus. O modelo da aeronave Boeing 747-8 (FIGURA 27) é o maior avião fabricado pela empresa norte americana, com capacidade máxima para transportar até 410 passageiros (BOEING, 2017).

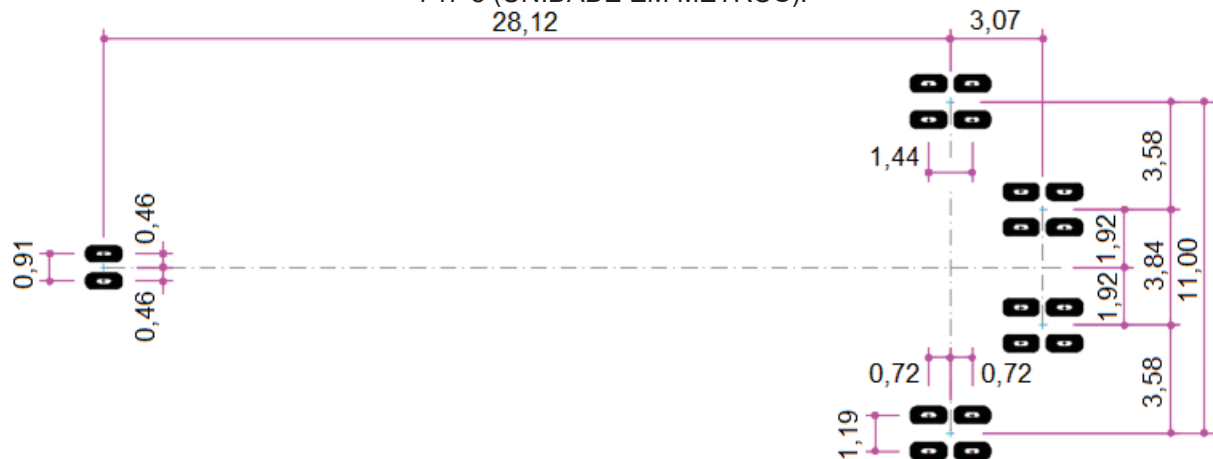
FIGURA 27 – AERONAVE BOEING 747.



FONTE: Boeing (2017).

A B747-8 com nível de combustível completo, tem capacidade para aproximadamente 238,61 mil litros, e pode atingir um alcance máximo de 14310 km de distância. Suas dimensões são de 76,30 metros de comprimento, envergadura de 68,40 metros e altura máxima de 19,40 metros da parte mais alta até a cauda. Essa aeronave, com nível de combustível máximo e carregada com sua capacidade total de passageiros, pode atingir até 449,056 toneladas de peso (parado ou no instante da decolagem). Porém, no momento de aterrissagem o Boeing 747-8 deve pesar no máximo 312 toneladas (FAARFIELD, 2018; BOEING, 2017). Sua configuração de trem de pouso principal e de nariz é mostrada na FIGURA 28.

FIGURA 28 – CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL E SECUNDÁRIO DO BOEING 747-8 (UNIDADE EM METROS).



FONTE: Boeing (2017).

#### 4.1.4 Boeing 777-300

O modelo da aeronave Boeing 777 (FIGURA 29) é constituído de uma família de aeronaves, sendo elas: Boeing 777-200, Boeing 777-200ER e Boeing 777-300. O maior avião dessa família é o que será utilizado para base de estudos nesta pesquisa, devido a carga por roda do trem de pouso principal ser mais elevada.

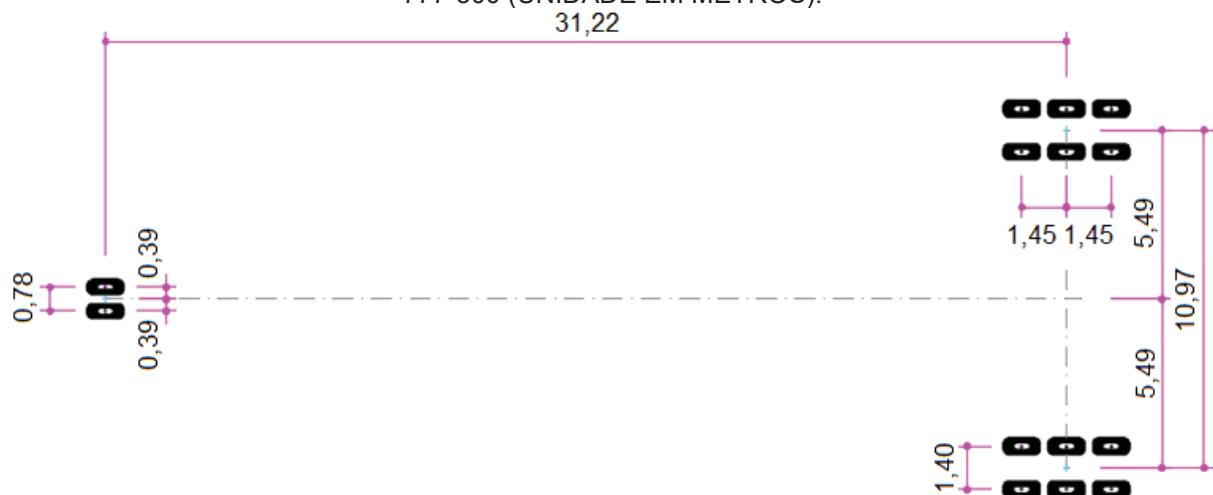
FIGURA 29 – AERONAVE BOEING 777.



FONTE: Boeing (2017).

Fabricado pela empresa norte americana, o modelo B777-300 possui uma capacidade máxima de transportar até 550 passageiros e um alcance máximo de até 11120 km de distância. Suas dimensões são compostas por um comprimento de 73,90 metros, envergadura de 60,90 metros e altura máxima de 18,50 metros da parte mais alta da cauda. Essa aeronave, com nível de combustível máximo de 171,17 mil litros e carregada com sua capacidade total de passageiros, pode atingir até 352 toneladas de peso (parada ou no instante da decolagem). Porém, no momento da aterrissagem o Boeing 777-300 deve pesar no máximo 252 toneladas (FAARFIELD, 2018; BOEING, 2017). Sua configuração de trem de pouso principal e de nariz é mostrada na FIGURA 30.

FIGURA 30 – CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL E SECUNDÁRIO DO BOEING 777-300 (UNIDADE EM METROS).



FONTE: Boeing (2017).

#### 4.1.5 Resumo das características técnicas das aeronaves utilizadas nesta pesquisa

As características técnicas fornecidas pelas fabricantes de aeronaves em estudo no presente trabalho, Airbus e Boeing, tais como: quantidade total de passageiros (QTP); peso máximo de pouso (PMP) e decolagem (PMD); especificações técnicas em termos de dimensões das aeronaves como comprimento ( $L_1$ ), envergadura ( $L_2$ ) e altura ( $L_3$ ); velocidade de pouso ( $V_p$ ); pressão nos pneus (PP); configuração do trem de pouso principal; número de classificação das aeronaves (ACN); estão resumidas nas TABELAS 7 e 8 para mais fácil visualização e comparação das demais.

TABELA 7 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS AERONAVES.

Tipo de Aeronave	$V_p$ [km/h]	Dimensões [m]			QTP	PMD [kN]	PMP [kN]	Carga por roda trem de pouso principal [kN]	
		$L_1$	$L_2$	$L_3$				Estática	Dinâmica
A380	256	72,72	79,75	24,09	853	5750	3940	273 (20x)	187 (20x)
A340-600	283	75,36	63,45	17,22	475	3800	2650	300 (12x)	209 (12x)
B747-8	284	76,30	68,40	19,40	410	4480	3120	266 (16x)	185 (16x)
B777-300	278	73,90	60,90	18,50	550	3520	2520	278 (12x)	199 (12x)

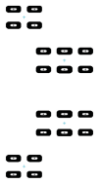



FONTE: Adaptado de Airbus e Boeing (2016).

Um ponto fundamental para a análise em estudo, e que não é fornecido nos manuais técnicos das aeronaves, é o ângulo de aterrissagem (rampa de aproximação).

Segundo a FAA (2009), as aeronaves devem possuir uma determinada declividade de aproximação, ou seja, o caminho que a aeronave deve seguir em aproximação final para pousar na pista do aeroporto, sendo que a situação ideal é que este caminho seja um declive suave.

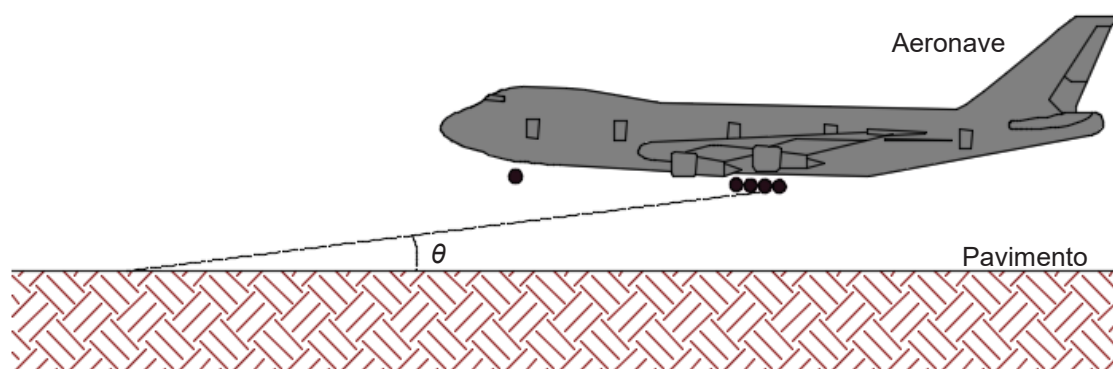
Uma inclinação comumente usada é de  $3^\circ$  (a partir da horizontal) (FAA, 2009). No entanto, alguns aeroportos possuem rampas de aproximação mais acentuadas, baseadas na topografia, existência de construções ou outras considerações. Decorrente disso, o ângulo de aterrisagem das aeronaves varia entre  $2^\circ$  e  $4^\circ$ , conforme FIGURA 31.

TABELA 8 – CONFIGURAÇÃO DO TREM DE POUSO PRINCIPAL DAS AERONAVES, ÂNGULOS DE ATERRISSAGENS, PRESSÃO NOS PNEUS E RESPECTIVOS CÓDIGOS ACN.

Tipo de Aeronave	Configuração do trem de pouso principal	PP [MPa]	Ângulo de Aterrisagem [°]	ACN <sup>12</sup>
A380		1,50	2 a 4	76
A340-600		1,53	2 a 4	83
B747-8		1,52	2 a 4	88
B777-300		1,52	2 a 4	89

FONTE: Adaptado de Airbus e Boeing (2016); FAA, 2009.

FIGURA 31 – ÂNGULO DA RAMPA DE APROXIMAÇÃO  $\theta$  NO INSTANTE DO POUSO DAS AERONAVES.



FONTE: O autor (2018).

<sup>12</sup> Pavimento Flexível, CBR do subleito entre 4% e 8%.

## 4.2 PAVIMENTO DE PISTAS DE AEROPORTOS

Existem diversas formas e possibilidades de formulação e elaboração das camadas dos pavimentos, considerando as diversas peculiaridades de cada região e de suas devidas obras (BALBO, 2007).

Para a modelagem da pista, nesta pesquisa foi considerado o pavimento mais usual no Brasil e no mundo (BALBO, 2007) – o pavimento flexível. A definição das características do pavimento baseou-se nas diretrizes para dimensionamento de pavimentos aeroportuários da AC 150/5320-6F da FAA (2016), usando o *software* denominado FAARFIELD – versão v 1.42, onde foi escolhido uma seção de pavimento exequível semelhante ao do Aeroporto Internacional de São Paulo em Guarulhos (MOTTA, 2018)<sup>13</sup>.

Para este estudo, foi utilizado materiais com características mecânicas capaz de suportar o tráfego das AMP e, com o auxílio do *software* e da base de dados<sup>14</sup>, foram calculadas as espessuras ( $e$ ) das camadas empregadas, e definidos os módulo de elasticidade ( $E$ ), assumindo como sendo igual ao módulo resiliente MR dos materiais de cada camada. Os respectivos coeficientes de Poisson ( $\nu$ ) e a massa específica ( $\rho$ ) foram definidos a partir da escolha dos materiais.

Ao definir a estrutura do pavimento aeroportuário, é necessário que haja compatibilidade entre a resistência do pavimento e as aeronaves que a utilizam. Para fins operacionais da atividade aeroportuária, essa compatibilidade é expressa através do método de classificação ACN/PCN. Para pavimentos flexíveis, o ACN deve ser obtido por meio do método CBR, no entanto, para determinação do PCN, este valor pode ser obtido a partir de dois métodos: o método de avaliação técnica ou método experimental. O método de avaliação técnica consiste na avaliação do valor numérico do PCN a partir da obtenção do peso bruto admissível que o pavimento suporta. Para isso, são considerados alguns parâmetros, como a frequência de operações e os níveis de tensões admissíveis, e então é obtido o peso bruto da aeronave através do processo inverso de dimensionamento. Para esse método, é necessária a avaliação do tráfego equivalente no aeródromo. No método experimental, são definidos os valores de ACN de todas as aeronaves usualmente autorizadas a utilizar o pavimento,

---

<sup>13</sup> MOTTA, L. M. G. **Seção de pavimento flexível utilizado no Aeroporto Internacional de São Paulo em Guarulhos com as respectivas características**. Rio de Janeiro, 2018. Comunicação pessoal.

e então o PCN do pavimento é definido como sendo o maior dentre estes valores (FAA, 2016; ANAC, 2016).

Para o seu dimensionamento, alguns pontos foram levados em consideração, como a qualidade do solo para subleito, frequência de movimentação anual das aeronaves em um determinado pavimento, tempo previsto de utilização e a pressão nos pneus das aeronaves.

A qualidade dos solos utilizados para subleitos é definida através de sua resistência, e possui categorias de classificação, como mostra a TABELA 9 (FAA, 2016; ANAC, 2016).

TABELA 9 – VALORES DE RESISTÊNCIA DE SUBLEITO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO ACN/PCN EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.

Categoria do subleito	Resistência do subleito CBR [%]	Resistência do subleito normalizada CBR [%]	Código
Alta	$\text{CBR} \geq 13$	15	A
Média	$8 < \text{CBR} < 13$	10	B
Baixa	$4 < \text{CBR} \leq 8$	6	C
Ultrabaixa	$\text{CBR} \leq 4$	3	D

FONTE: Adaptado da FAA e ANAC (2016).

Portanto, a categoria do subleito adotado neste estudo foi definida como baixa, sendo CBR do subleito entre que 4% e 8%, ou seja, a resistência do subleito normalizado possui CBR de 6%, caracterizado pela FAA (2016) como código C.

Pelo fato do FAARFIELD fazer dimensionamento de pavimentos utilizando critérios de fadiga, a frequência de movimentação anual das AMP é fundamental e deve ser estabelecida como parâmetro de cálculo.

A adoção dos valores das frequências baseou-se no aeroporto mais movimentado do país: o Aeroporto Internacional de São Paulo. Este aeroporto é uma referência importante, uma vez que as aeronaves desta pesquisa realizam ao menos uma decolagem diária no mesmo. A TABELA 10 apresenta a quantidade de decolagens anual (QDA) das aeronaves em estudo referente ao Aeroporto Internacional de São Paulo e ao Aeroporto Internacional de Atlanta, situado nos Estados Unidos da América, que é o mais movimentado do mundo (FLIGHT STATS, 2018). No dimensionamento do pavimento foi realizado uma verificação para os dois tráfegos aéreos, no entanto, obtiveram os mesmos resultados.

TABELA 10 – FREQUÊNCIA ANUAL DE DECOLAGENS DAS AERONAVES NO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO NO BRASIL E DE ATLANTA NOS EUA.

Aeronaves	QDA	
	São Paulo - Brasil	Atlanta - EUA
A380	365	-
A340-600	1460	1095
B747-8	6935	2190
B777-300	6570	8760

FONTE: Adaptado da ANAC (2016) e Flight Stats (2018).

Com essas definições estabelecidas, o último parâmetro a ser determinado é a escolha de materiais comumente usados na execução, e que atenda às necessidades de compatibilidade e vida útil de 20 anos, recomendadas pelas diretrizes da FAA.

O pavimento flexível é composto por um número maior de camadas, comparado ao pavimento rígido (BALBO, 2007). Segundo diretrizes estabelecidas pelo FAARFIELD (2018), a quantidade de camadas utilizadas para o pavimento flexível aeroportuário deve possuir um número mínimo de 3 camadas, mais o subleito.

A primeira camada, denominada revestimento flexível, é composta por concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ). Na segunda camada, denominada base, foi adotado concreto compactado a rolo (CCR); na terceira camada, denominada sub-base, o material considerado foi uma brita graduada simples (BGS); e na quarta camada foi estabelecido um reforço do subleito.

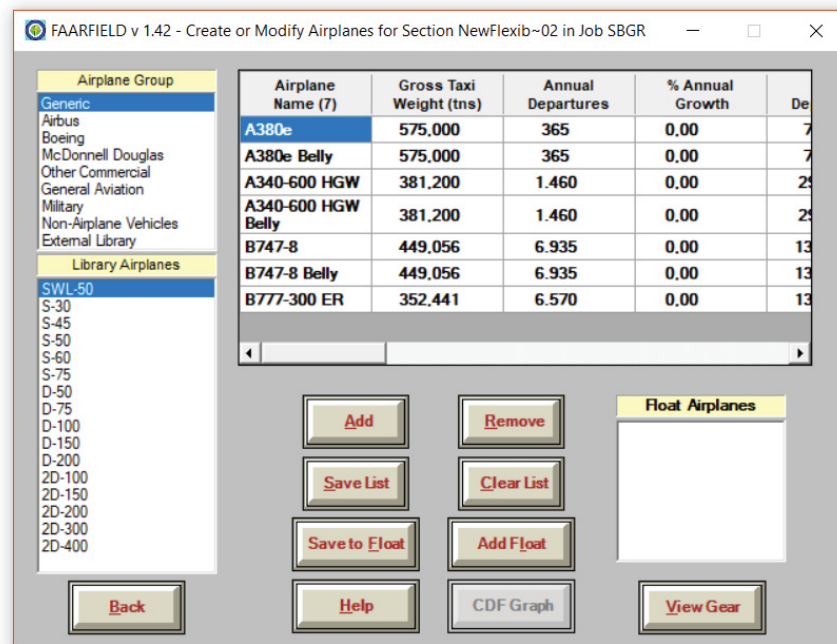
A fundação, denominada subleito, foi definida para um solo natural compactado, com CBR de 5,2%. Segundo Zaghloul e White (1993), o comportamento estrutural do pavimento sempre será afetado pela espessura adotada na modelagem computacional.

Ao realizar o dimensionamento com o auxílio do *software* FAARFIELD com base nas características mencionadas por Motta<sup>14</sup> (2018), foi obtido o seguinte pavimento aeroportuário com suas respectivas características técnicas (FIGURAS 32 e 33).

<sup>14</sup> MOTTA, L. M. G. **Seção de pavimento flexível utilizado no Aeroporto Internacional de São Paulo em Guarulhos com as respectivas características**. Rio de Janeiro, 2018. Comunicação pessoal

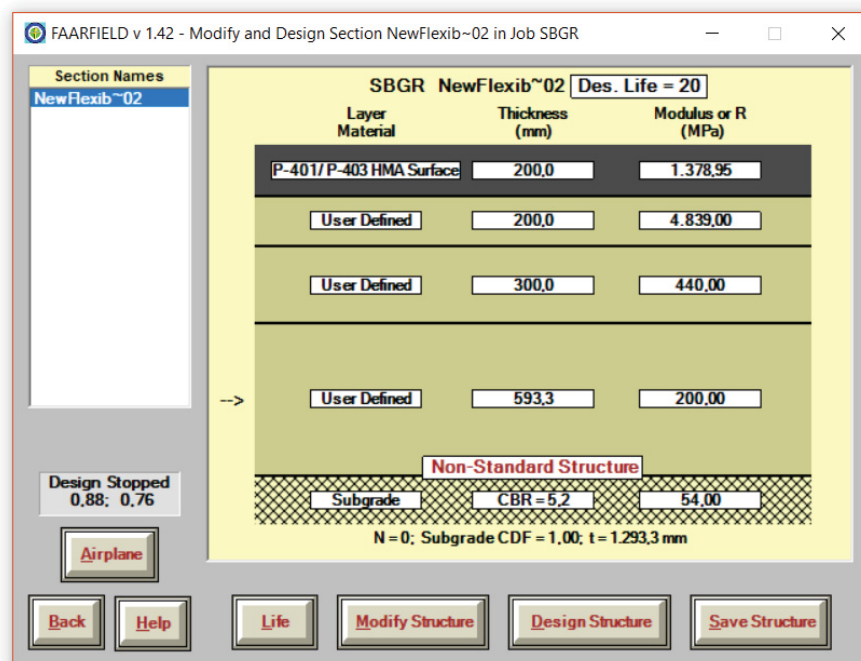


FIGURA 32 – AERONAVES E TRÁFEGO ANUAL ADOTADO NO DIMENSIONAMENTO VIA SOFTWARE FAARFIELD VERSÃO V 1.42.



FONTE: FAARFIELD (2018).

FIGURA 33 – DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO VIA SOFTWARE FAARFIELD VERSÃO V 1.42.



FONTE: FAARFIELD (2018).

De acordo com as diretrizes da FAA (2016), Motta (2018)<sup>15</sup> e os critérios utilizados para realização do dimensionamento do pavimento aeroportuário desta

<sup>15</sup> MOTTA, L. M. G. **Seção de pavimento flexível utilizado no Aeroporto Internacional de São Paulo em Guarulhos com as respectivas características**. Rio de Janeiro, 2018. Comunicação pessoal.

pesquisa, este é um pavimento que pode ser classificado como PCN 89/F/C/W/U com espessura total de 1,30 metros, onde, os códigos de classificação (F, D, X e U) são referentes ao tipo de pavimento (F-Flexível ou R-Rígido), CBR do subleito (TABELA 9), pressão máxima permitida nos pneus das aeronaves (TABELA 11) e método de determinação do valor do PCN (T, para método de avaliação técnica ou U, para avaliação experimental).

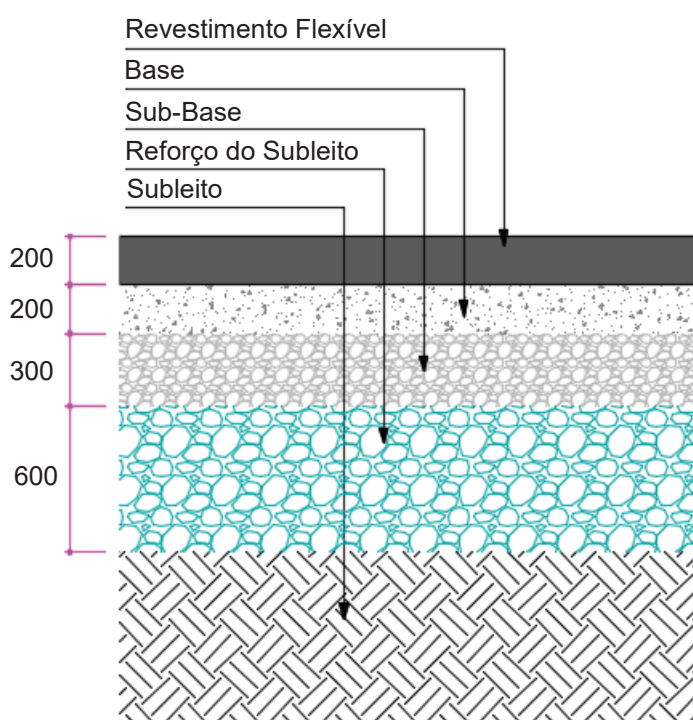
TABELA 11 – CÓDIGO DE PRESSÃO DOS PNEUS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO ACN-PCN.

Categoria	Código	Pressão máxima permitida nos pneus [MPa]
Ilimitada	W	Sem limite de pressão
Alta	X	Pressão limitada a 1,75 MPa
Média	Y	Pressão limitada a 1,25 MPa
Baixa	Z	Pressão limitada a 0,5 MPa

FONTE: FAA (2016).

Assim, a montagem e as características técnicas das camadas do pavimento flexível e do subleito, com as espessuras que seriam executada, são apresentadas na FIGURA 34 (arredondadas para valores inteiros, por conveniência).

FIGURA 34 – MONTAGEM DAS CAMADAS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL E O SUBLEITO, COM SUAS RESPECTIVAS ESPESSURAS (UNIDADE EM MILÍMETROS).



FONTE: O autor (2018).

Na TABELA 12 é apresentado um resumo das propriedades e características da seção de pavimento adotado neste trabalho:

TABELA 12 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL E SUBLEITO.

Camadas	$e$ [mm]	$\nu$	$E$ [MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Material das camadas
Revestimento	200	0,35	1379	2500	CBUQ com CAP > 5%
Base	200	0,35	4839	2500	CCR
Sub-base	300	0,35	440	2200	BGS
Reforço do Subleito	600	0,35	200	2000	Não definido
Subleito	Infinita	0,35	54	2000	Solo Compactado CBR 5,2%

FONTE: O autor (2018).

onde, a espessura ( $e$ ) foi adotada de acordo com a FIGURA 34, o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e o módulo de Young ( $E$ ) foram adotados a partir dos parâmetros mencionado por Motta (2018)<sup>16</sup> e *software* FAAFIELD para os materiais descritos. A massa específica ( $\rho$ ) foi adotada a partir das referências de Balbo (2007).

#### 4.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem computacional deste trabalho foi realizada com o auxílio do *software* ANSYS, por meio de uma análise tridimensional estática e dinâmica de elementos finitos. A estrutura de modelagem pelo MEF foi constituída da seguinte forma: pré-processamento, solução e pós-processamento (BATHE, 1996), conforme apresentado na TABELA 13.

TABELA 13 - ESTRUTURA DA MODELAGEM COMPUTACIONAL.

Pré-processamento	Solução	Pós-processamento
- Definição da geometria do modelo	- Execução dos cálculos	- Visualização dos resultados
- Propriedades dos materiais	- Mecanismos de convergência	- Listagem dos resultados
- Malha em elementos finitos		- Tensões
- Condições de contorno		- Deformações
		- Deslocamentos
		- Forças de reação

FONTE: O autor (2018).

<sup>16</sup> MOTTA, L. M. G. **Seção de pavimento flexível utilizado no Aeroporto Internacional de São Paulo em Guarulhos com as respectivas características**. Rio de Janeiro, 2018. Comunicação pessoal.

A etapa de pós-processamento será discutida no próximo capítulo, com exceção dos resultados de validação do modelo.

#### 4.3.1 Validação do modelo

Para certificar a validade do modelo estrutural, foram realizadas análises numéricas estáticas e dinâmicas. Essa validação refere-se aos parâmetros usados na modelagem computacional e está dividida em dois modelos, conforme mostra a TABELA 14.

TABELA 14 – MODELAGEM NUMÉRICA DE VALIDAÇÃO.

Modelo computacional	Tipo de análise numérica	Validação
A	Estática	Definição da espessura do subleito na modelagem final
B	Dinâmica	Aplicação da pressão de inflação no pneu
		Área de contato pneu-pavimento
		Aplicação da carga de pouso da aeronave
		Aplicação da velocidade de pouso da aeronave

FONTE: O autor (2018).

No modelo computacional A, através da análise estática, definiu-se a espessura do subleito adequada, de forma que não interferisse nos resultados finais da pesquisa. No modelo computacional B, foram realizadas simulações de análises dinâmicas, com base no estudo realizado por Saad, Mitri e Poorooshasb (2005), para validar a aplicação da pressão de inflação no pneu, a influência da área de contato pneu-pavimento e as aplicações de carga e velocidade de pouso da aeronave.

##### 4.3.1.1 Modelo computacional A

Neste modelo, para a definição da espessura do subleito, realizaram-se análises estáticas para vários pavimentos com diferentes espessuras de subleito. Essas simulações foram realizadas utilizando as características do pavimento flexível dimensionado e definido na seção 4.2, com uma aplicação de pressão de contato

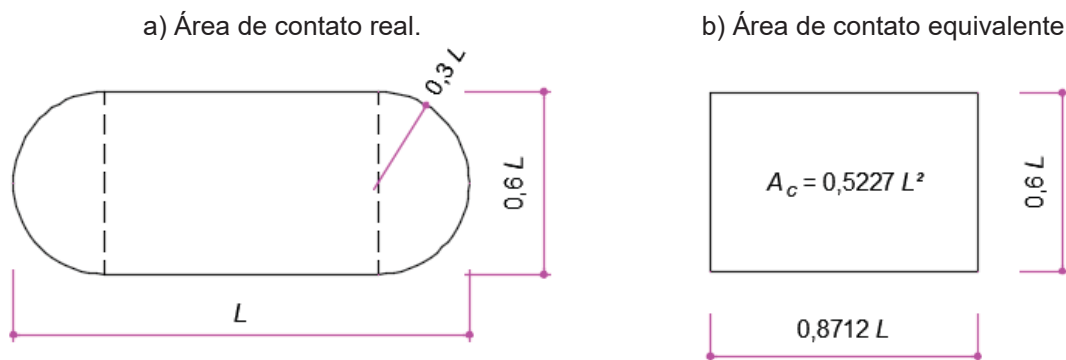
sobre uma área equivalente ao de um pneu aeronáutico<sup>17</sup>. Para os materiais empregados nas camadas do pavimento, foi considerado o comportamento elástico linear.

De acordo com Huang (1993), a área de contato ( $A_c$ ) pneu-pavimento pode ser assumida como uniforme, cujo tamanho depende da pressão de contato, sendo igual à carga da roda estática ( $p$ ) sobre a pressão de inflação do pneu ( $\sigma$ ), apresentado na equação (23).

$$A_c = \frac{p}{\sigma}, \quad A_c = \pi(0,3L)^2 + 0,6L(L - 0,3L \cdot 2), \quad A_c = 0,5227L^2 \quad (23)$$

Porém, na análise numérica desta modelagem foi empregada uma forma aproximada da área de contato do pneu. Ao assumir o comprimento ( $L$ ) e a largura ( $0,6L$ ), a área de contato pode ser definida, como mostram as FIGURAS 35a e 35b.

FIGURA 35 – ÁREA DE CONTATO REAL ENTRE A SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO E O PNEU.



FONTE: Adaptado de Huang (1993).

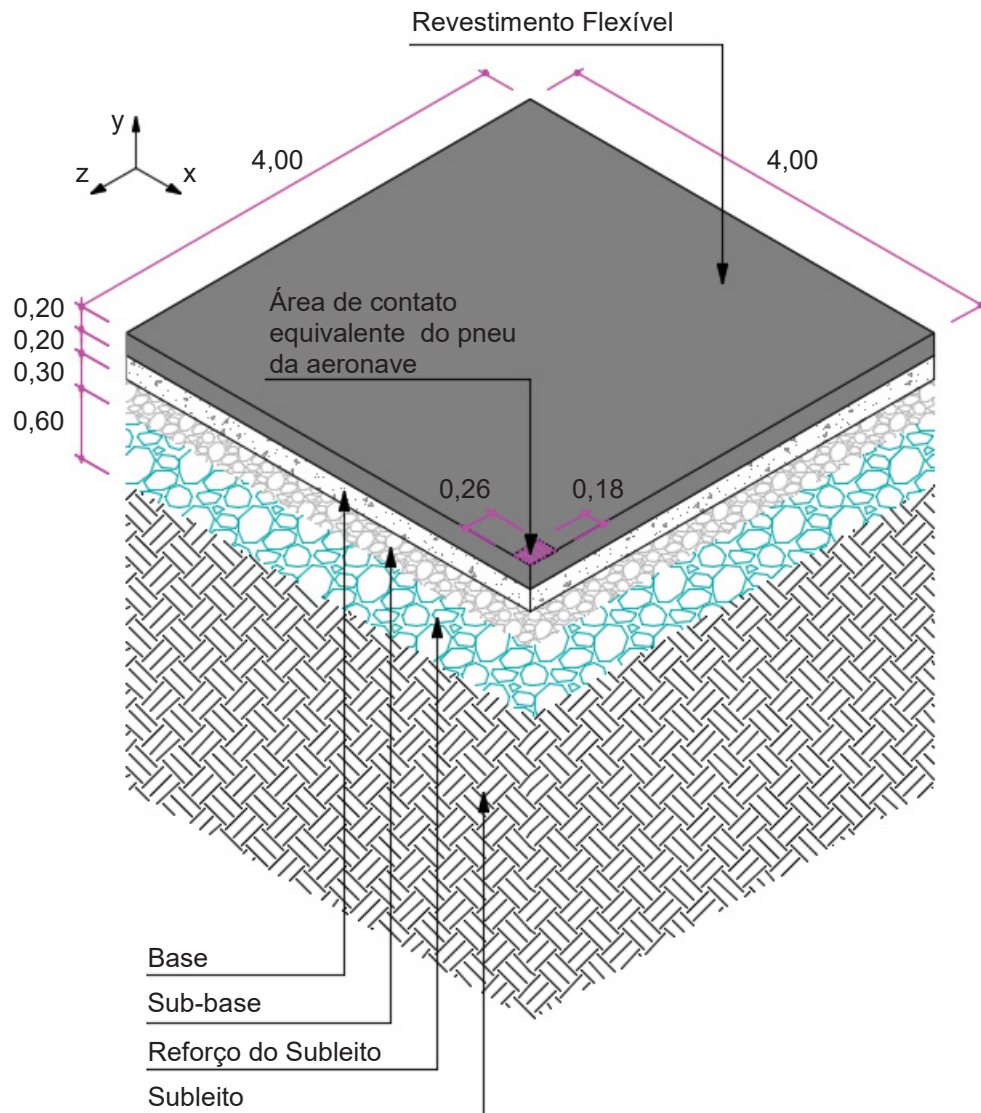
Deste modo, tomando como exemplo o A380, conforme as TABELA 7 e 8, considerando a pressão de inflação do pneu igual a 1,50 MPa, e a força de 273 kN (27,3 tf), como a carga da roda, determina-se o comprimento  $L$  sendo igual a 0,60 metros, através da equação (24).

$$L = \sqrt{\frac{A_c}{0,5227}} \quad (24)$$

Para minimizar o esforço computacional no processo de cálculo, foi modelada apenas um quarto da área de contato, como mostra a FIGURA 36.

<sup>17</sup> O pneu aeronáutico utilizado nesta modelagem de validação pertence ao trem de pouso principal de um Airbus A380. Sua classificação é do tipo radial NZG (*Near Zero Growth*) modelo 1400x530 R23 com dimensões de 1400 mm de diâmetro global, 530 mm de largura nominal da seção transversal e aro com raio de 23" (584,2 mm), com fabricação pela empresa francesa Michelin.

FIGURA 36 – POSICIONAMENTO DA ÁREA DE CONTATO EQUIVALENTE NO PAVIMENTO FLEXÍVEL EM 3D (UNIDADE EM METROS).



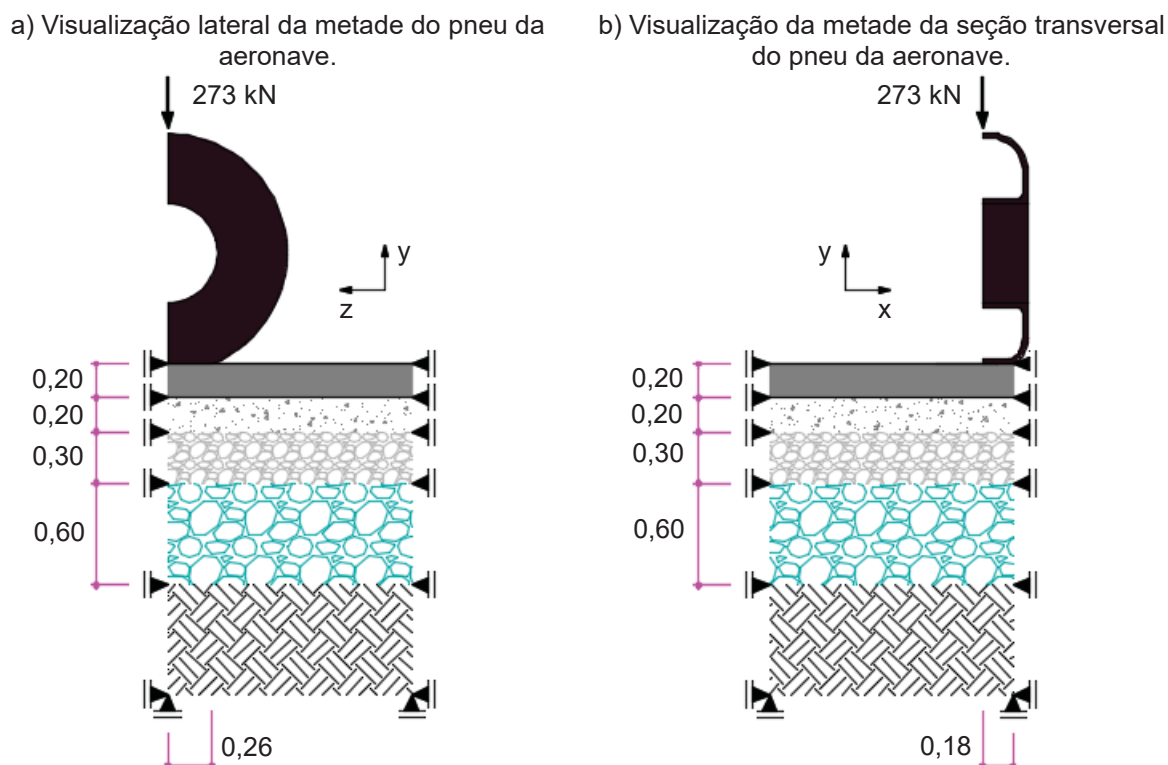
FONTE: O autor (2018).

Neste caso, por utilizar apenas um quarto da área de contato da carga aplicada pela aeronave, o modelo estrutural foi discretizado com o auxílio da dupla simetria<sup>18</sup>, através da aplicação das condições de contorno, onde as faces paralelas das camadas do pavimento nas direções  $x$  e  $z$  foram restringidas para deslocamentos horizontais, e o fundo do subleito restringido para deslocamentos verticais, como mostram as FIGURAS 37a e 37b.

<sup>18</sup> O eixo de simetria do problema coincide com o centro da roda da aeronave Airbus A380.



FIGURA 37 – DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTO RNO DO MODELO DE VALIDAÇÃO A (UNIDADE EM METROS).



FONTE: O autor (2018).

Definidas essas condições, o domínio deste modelo de validação foi discretizado. Para a concepção da malha do pavimento foi empregado o elemento finito SOLID 45 (elemento hexaédrico de oito nós com três graus de liberdade cada, considerando deslocamentos nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ ). A quantidade de elementos finitos para cada análise e as respectivas espessuras do subleito utilizadas nas análises estáticas são apresentadas na TABELA 15.

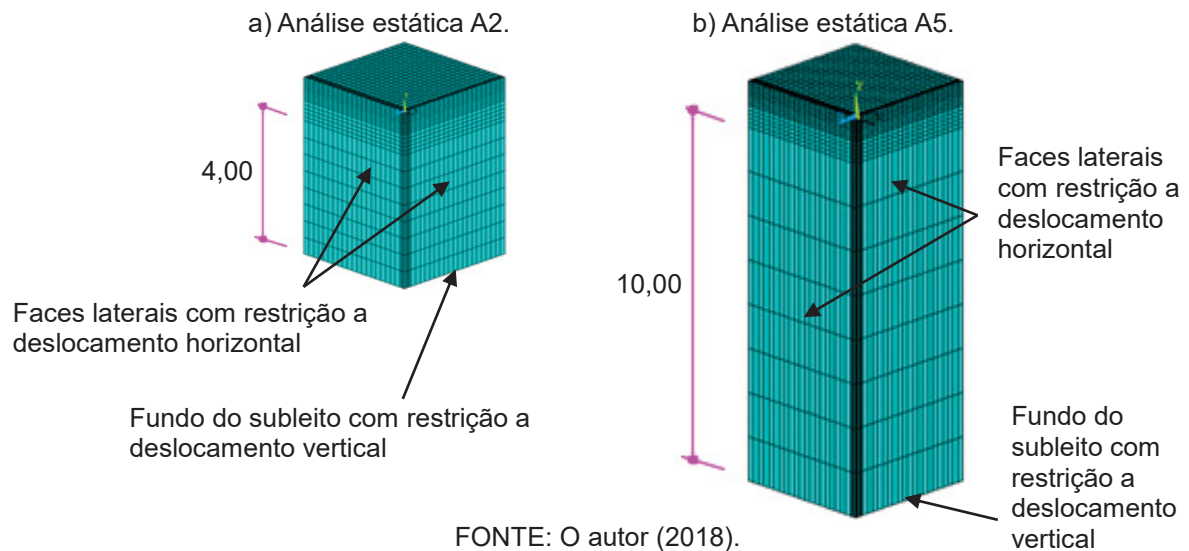
TABELA 15 – QUANTIDADE DE ELEMENTOS FINITOS POR CAMADAS NO MODELO A.

Modelo de análise estática	Espessura do subleito [m]	Quantidade de elementos finitos				Número total de elementos finitos
		Revestimento	Base	Sub-base	Subleito	
A1	2	2496	2496	6240	4992	16224
A2	4	2496	2496	6240	4992	16224
A3	6	2496	2496	6240	4992	16224
A4	8	2496	2496	6240	4992	16224
A5	10	2496	2496	6240	4992	16224
A6	12	2496	2496	6240	4992	16224

FONTE: O autor (2018).

Nas FIGURAS 38a e 38b são apresentadas as malhas para apenas duas análises realizadas: A2 – considerando o subleito com espessura de 4 metros e A5 – considerando o subleito com espessura de 10 metros. Para efeito de comparação, são apresentados apenas dois modelos, uma vez que os demais são semelhantes.

FIGURA 38 – MALHA EM ELEMENTOS FINITOS DAS ANÁLISES ESTÁTICAS COM AS CONDIÇÕES DE CONTO: a) MODELO A2 E b) MODELO A5 (UNIDADE EM METROS).



A partir destas análises, foram apresentados diversos resultados para as diferentes espessuras de subleito. As FIGURAS 39 a 41 mostram os campos de tensões para os modelos analisados. A TABELA 16 apresenta os resultados obtidos com os modelos nas diferentes profundidades da seção do pavimento.

FIGURA 39 – TENSÕES  $\sigma_x$  NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A: a) MODELO A2 E b) MODELO A5 (UNIDADE EM PASCAL).

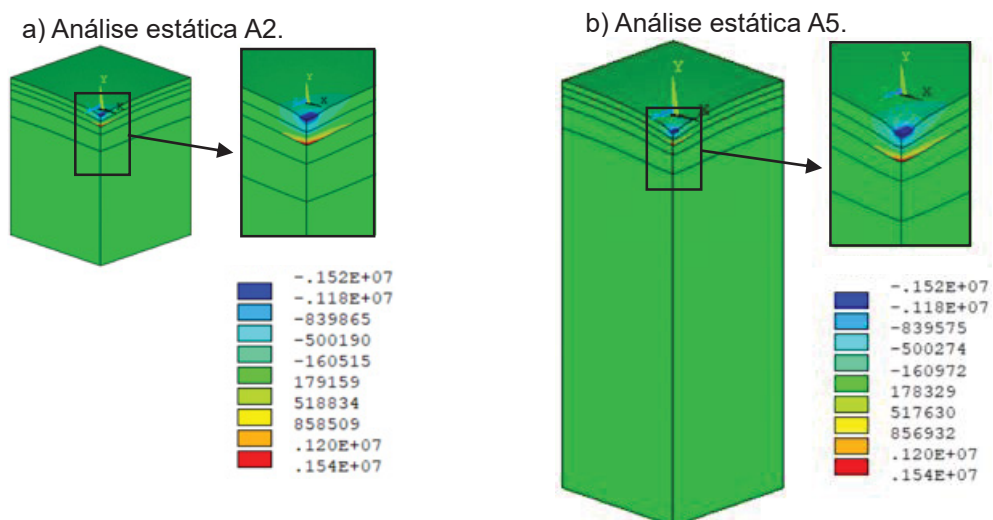
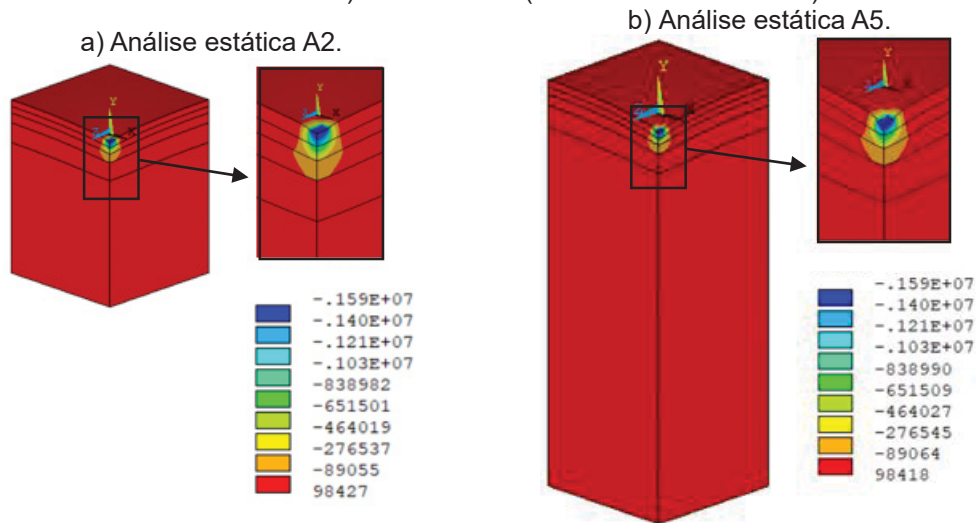


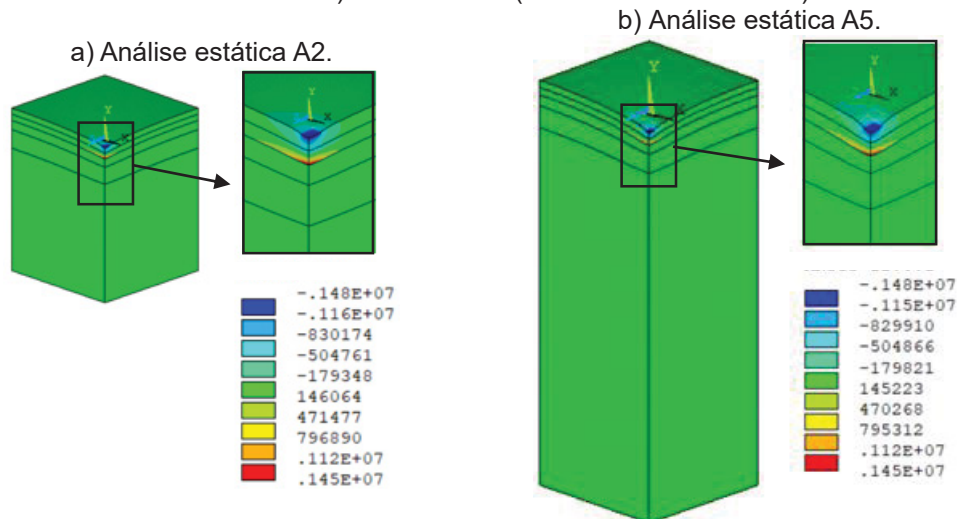


FIGURA 40 – TENSÕES  $\sigma_y$  NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A: a) MODELO A2 E b) MODELO A5 (UNIDADE EM PASCAL).



FONTE: O autor (2018).

FIGURA 41 – TENSÕES  $\sigma_z$  NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A: a) MODELO A2 E b) MODELO A5 (UNIDADE EM PASCAL).



FONTE: O autor (2018).

TABELA 16 – TENSÕES NO TOPO E FUNDO DO SUBLEITO (SL).

Modelo de análise estática	$\sigma_x$ [MPa]		$\sigma_y$ [MPa]		$\sigma_z$ [MPa]	
	Topo	Fundo	Topo	Fundo	Topo	Fundo
A1	0,0194	- 0,0010	- 0,0317	- 0,0227	0,0192	- 0,0011
A2	0,0224	- 0,0019	- 0,0243	- 0,0058	0,0222	- 0,0058
A3	0,0223	- 0,0023	- 0,0234	- 0,0047	0,0221	- 0,0047
A4	0,0220	- 0,0023	- 0,0227	- 0,0045	0,0218	- 0,0023
A5	0,0216	- 0,0023	- 0,0221	- 0,0044	0,0215	- 0,0023
A6	0,0212	- 0,0023	- 0,0215	- 0,0043	0,0210	- 0,0023

FONTE: O autor (2018).

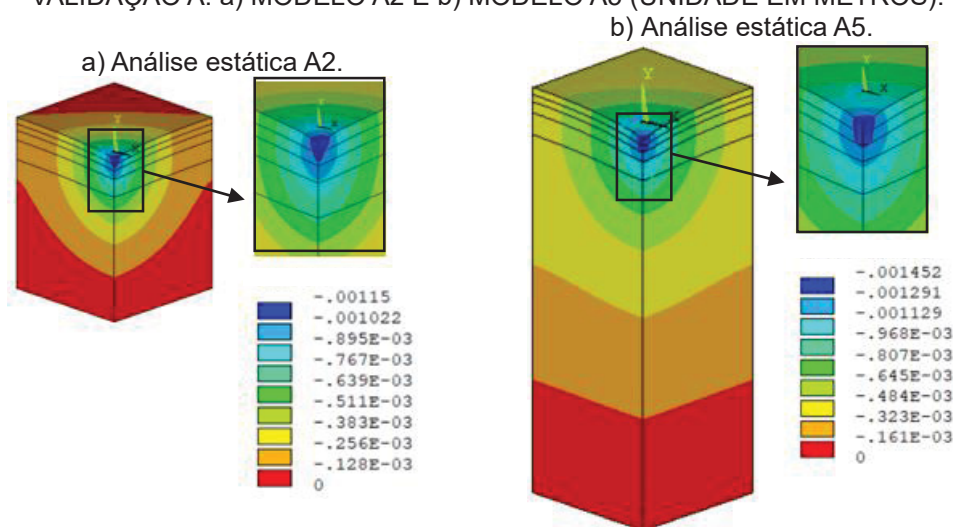
A TABELA 17 e as FIGURAS 42a e 42b mostram os campos dos deslocamentos verticais para os modelos de análises.

TABELA 17 – DEFLEXÃO (DESLOCAMENTOS  $u_y$ ) NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO, NO TOPO DO SUBLEITO E A 1,5 METROS ABAIXO DO TOPO DO SUBLEITO.

Modelo de análise estática	$u_y$ [mm]		
	Superfície	Topo do SL	1,5m abaixo do topo do SL
A1	- 0,936	- 0,453	- 0,010
A2	- 1,150	- 0,678	- 0,263
A3	- 1,251	- 0,779	- 0,364
A4	- 1,351	- 0,881	- 0,470
A5	- 1,452	- 0,982	- 0,468
A6	- 1,552	- 1,083	- 0,642

FONTE: O autor (2018).

FIGURA 42 – DEFLEXÃO (DESLOCAMENTOS  $u_y$ ) NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A: a) MODELO A2 E b) MODELO A5 (UNIDADE EM METROS).



FONTE: O autor (2018).

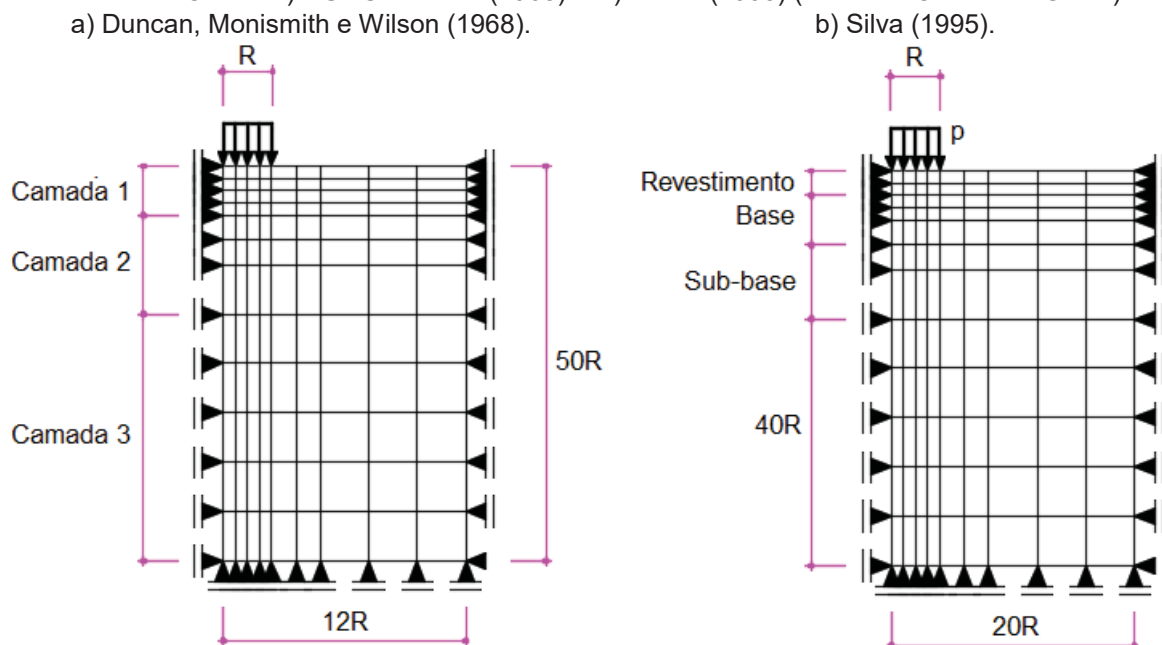
Com a realização das simulações para diferentes espessuras do subleito apresentadas, pode-se analisar e avaliar a espessura, bem como estudar a área de influência ideal para a modelagem desta pesquisa.

O problema da zona de influência da carga de roda com relação às dimensões do subleito na pavimentação foi primeiramente estudado por Duncan, Monismith e Wilson (1968). Em seu estudo, os autores propuseram tamanhos de domínios para modelagens de elementos finitos axissimétricos e incorporaram o comportamento de

material não-linear em suas análises. Inicialmente, eles investigaram um domínio adequado de modelo axissimétrico, para obter uma comparação razoável com as análises computacionais. Segundo os autores, para a modelagem computacional de uma estrutura multicamadas do tipo pavimento flexível, elástico linear, a espessura total do pavimento deve ser de aproximadamente 50 vezes o raio da área de aplicação da carga, com restrições radiais de uma distância 12 vezes o raio desta mesma área, para obter resultados mais precisos (FIGURA 43a). No entanto, estes autores realizaram análises para apenas um tipo de solo para o subleito, solo coesivo.

Silva (1995) apresentou uma sub-rotina para o programa FEPAVE (*Finite Element Analysis of Pavement Structures*) que calcula e realiza de forma automática o tamanho da malha e sua discretização. Em sua modelagem foram utilizados elementos quadrangulares formados por quatro triângulos. Segundo esta pesquisadora, a malha mínima deve apresentar um limite radial de 20 vezes o tamanho do raio de carregamento e um limite vertical de 45 a 50 vezes este mesmo raio, sendo a profundidade do subleito de no mínimo 40 vezes a dimensão do raio da carga (FIGURA 43b).

FIGURA 43 – CONFIGURAÇÃO UTILIZADA NA ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS BIDIMENSIONAL: a) DUNCAN et. al (1968) E b) SILVA (1995) (DESENHO SEM ESCALA).

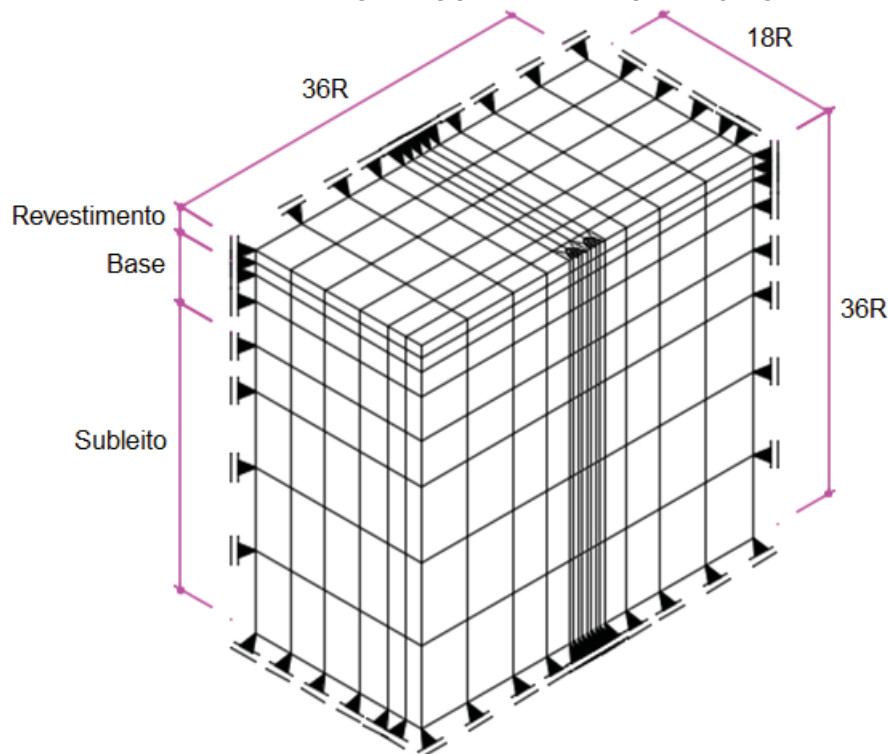


FONTE: Modificado de Duncan, Monismith e Wilson (1968); Silva (1995).

Aedo (1997) implementou através do MEF um programa tridimensional não-linear para análise de pavimentos asfálticos, conhecido como RIOPAVE. O programa

considera um carregamento com diversas rodas, malhas mais discretizadas e um número maior de elementos finitos do que Silva. Segundo este pesquisador, a malha deve ser desenvolvida com as mesmas dimensões na largura, comprimento e profundidade, sendo de 36 vezes o tamanho do raio de carregamento, no caso de um pavimento composto por 3 camadas sem o auxílio da simetria (FIGURA 44).

FIGURA 44 – CONFIGURAÇÃO DA MALHA EM ELEMENTOS FINITOS PARA FORMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL COM ELEMENTOS DE 8 NÓS.



FONTE: Modificado de Aedo (1997).

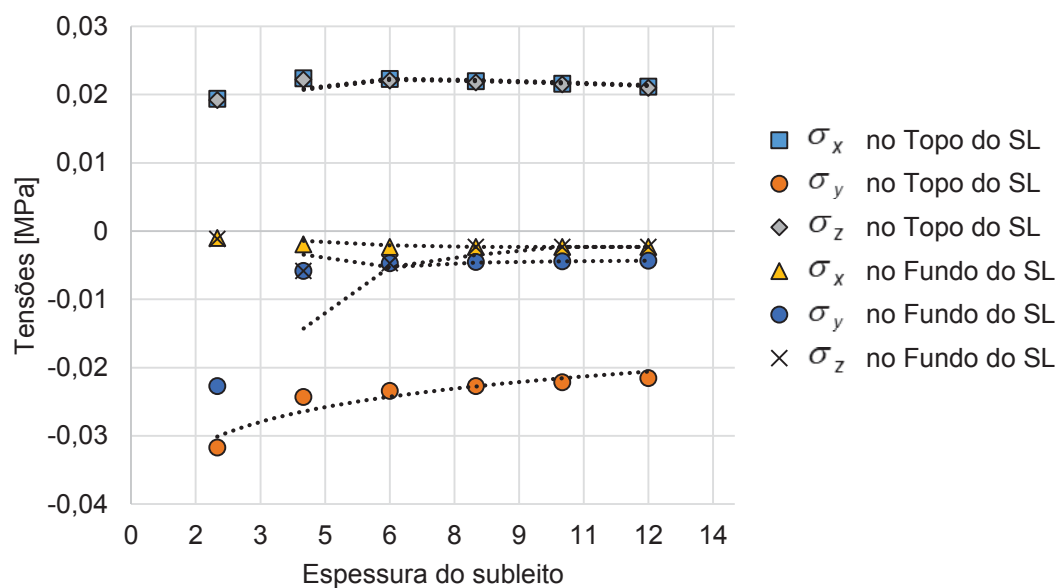
Ao desenvolver, aperfeiçoar e implantar uma versão da “macro”, do programa Excel, que permitia realizar a digitação dos dados de entrada do programa e a leitura dos resultados, de forma mais rápida e fácil, na utilização do programa FEPAVE, Franco (2004), utilizou os mesmos limites de domínios estabelecidos por Silva (1995).

Evangelista Jr., Silva e Soares (2015) apresentaram análises axissimétricas em modelos computacionais elástico não-linear e elástico-linear, com o objetivo de analisar qualitativamente a distribuição das tensões nas camadas do pavimento asfáltico. Em seu modelo, foi adotada uma espessura de subleito de aproximadamente 40 vezes o raio de aplicação da carga, com um limite radial de aproximadamente 20 vezes este mesmo raio.

Ambos os estudos foram idealizados para pavimentos rodoviários. Em pavimentos de pistas de aeroportos, e em especial se for considerada uma AMP, as dimensões que tornariam o modelo mais adequado podem ser muito elevadas, implicando em um maior custo computacional devido ao aumento de elementos finitos da malha.

Ao analisar o modelo computacional A, em que foi adotado o limite radial estabelecido por Duncan, Monismith e Wilson (1968) com diferentes profundidades de subleito, as tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  apresentaram valores muito baixos no topo e fundo do subleito, valores que praticamente permaneceram constantes a partir da profundidade de aproximadamente 1,0 metro de sub-base. Portanto, essas simulações mostraram que esses valores são satisfatórios (TABELA 16 e FIGURA 45).

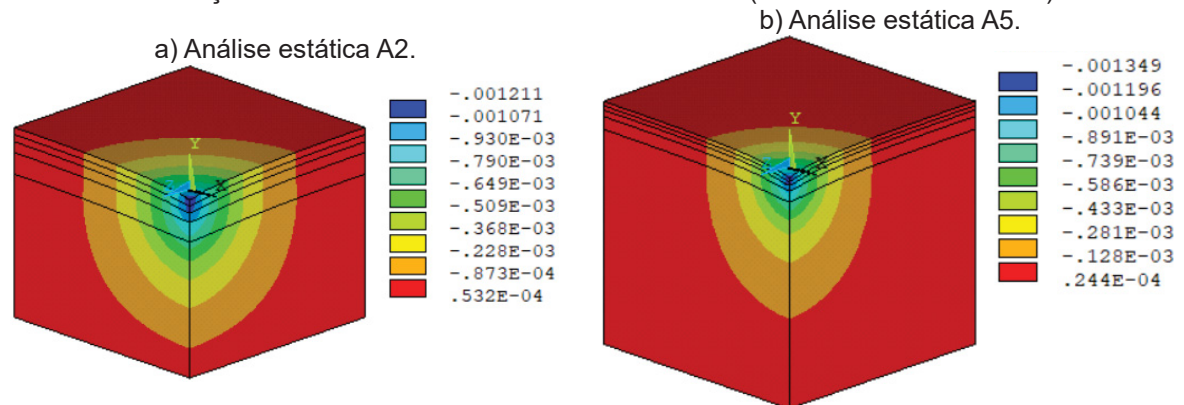
FIGURA 45 – TENSÕES NO TOPO E FUNDO DO SUBLEITO PARA DIFERENTES ESPESSURAS DE SUBLEITO.



Fonte: O autor (2018).

Na análise das deflexões, notou-se que há uma relação entre a profundidade do subleito e a área de influência de aplicação da carga, relação que foi observada logo nos modelos iniciais A1 e A2. Ou seja, ao adotar um modelo elástico-linear com uma determinada profundidade de subleito, o limite radial para aplicação da carga, apresenta uma determinada proporcionalidade a esta profundidade, como mostram as FIGURAS 46a e 46b.

FIGURA 46 – DEFLEXÕES (DESLOCAMENTOS  $u_y$ ) NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A COM AS DIMENSÕES ADEQUADAS (UNIDADE EM METROS).



FONTE: O autor (2018).

A TABELA 18 a seguir, apresenta os valores das deflexões para os modelos analisados estaticamente, em função da espessura de subleito considerada e da área de influência ideal.

TABELA 18 – DIMENSÕES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS NA MODELAGEM COMPUTACIONAL E DEFLEXÕES (DESLOCAMENTOS  $u_y$ ) NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO.

Modelo de análise estática	Dimensões do pavimento flexível				Rigidez do pavimento	$u_y$ [mm]
	Largura [m]	Comprimento [m]	Espessura do SL [m]	Espessura total [m]		
A1	4,00	4,00	2,00	3,30	+ rígido	- 0,93
A2	6,50	6,50	4,00	5,30		- 1,21
A3	8,00	8,00	6,00	7,30		- 1,23
A4	9,50	9,50	8,00	9,30		- 1,32
A5	11,50	11,50	10,00	11,30		- 1,34
A6	12,00	12,00	12,00	13,30		- 1,36
A7 <sup>19</sup>	30,00	30,00	30,00	31,30	- rígido	- 1,35

FONTE: O autor (2018).

Em resumo, percebeu-se que ao comparar os resultados de deflexões (TABELA 19 e FIGURAS 47a e 47b) das análises sem e com a área de influência ideal, as diferenças foram significativas a partir do momento em que aumenta a espessura do subleito em proporcionalidade com a área de influência.

<sup>19</sup> Modelo de validação adicional (modelo computacional A7) composto por 20.592 elementos finitos.

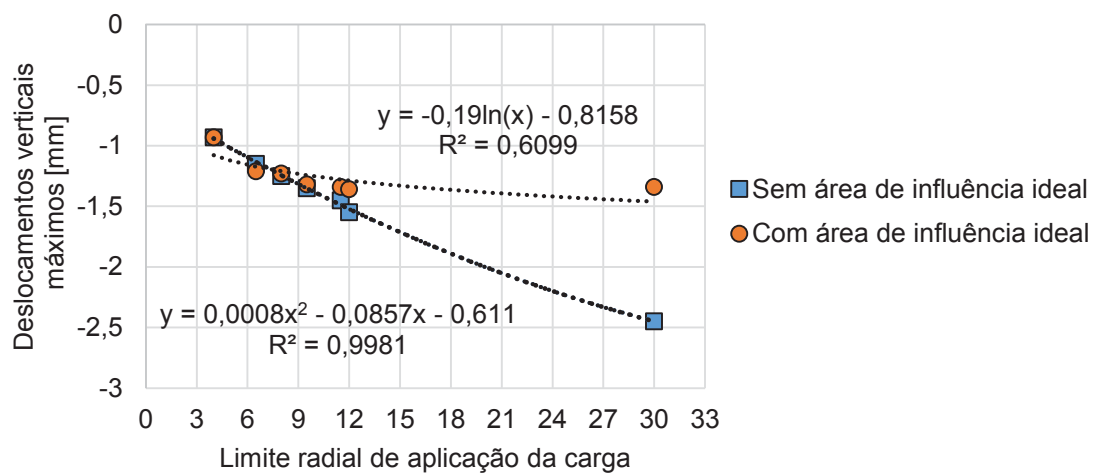
TABELA 19 – PERCENTUAL DA DIFERENÇA DE DEFLEXÕES MÁXIMAS NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO COM E SEM A ÁREA DE INFLUÊNCIA IDEAL NA ANÁLISE.

Modelo de análise estática	Deflexões máximas		Percentual de diferença entre as análises [%]
	Sem área de influência ideal	Com área de influência ideal	
A1	- 0,93	- 0,93	Nulo
A2	- 1,15	- 1,21	5,22
A3	- 1,25	- 1,23	1,63
A4	- 1,35	- 1,32	2,27
A5	- 1,45	- 1,34	8,21
A6	- 1,55	- 1,36	12,26
A7	- 2,45	- 1,35	45,30

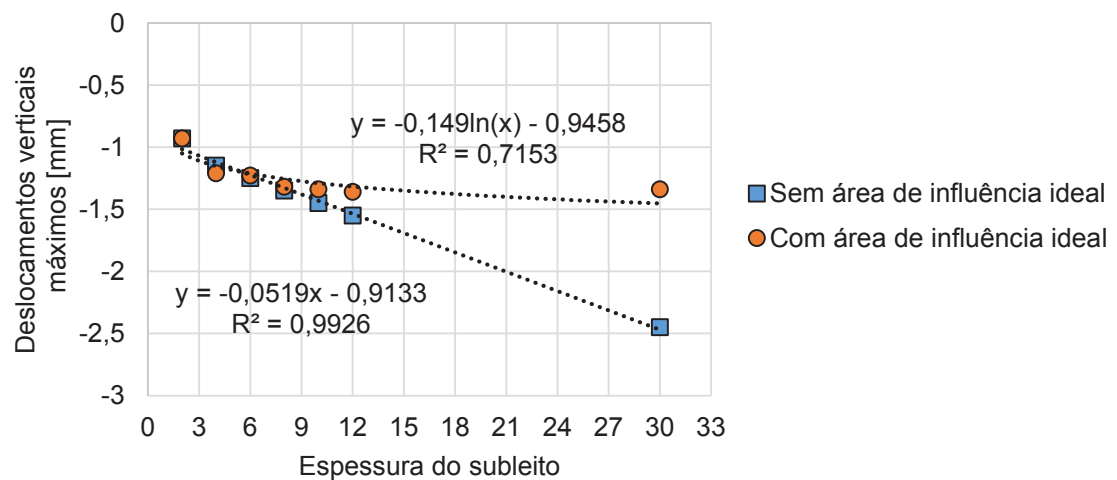
FONTE: O autor (2018).

FIGURA 47 – DEFLEXÕES MÁXIMAS NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO EM FUNÇÃO DO a) LIMITE RADIAL DE APLICAÇÃO DA CARGA E DA b) ESPESSURA DO SUBLEITO, PARA OS MODELOS DE ANÁLISES ESTÁTICAS SEM E COM A ÁREA DE INFLUÊNCIA IDEAL.

a) Limite radial de aplicação da carga.



b) Espessura do subleito.



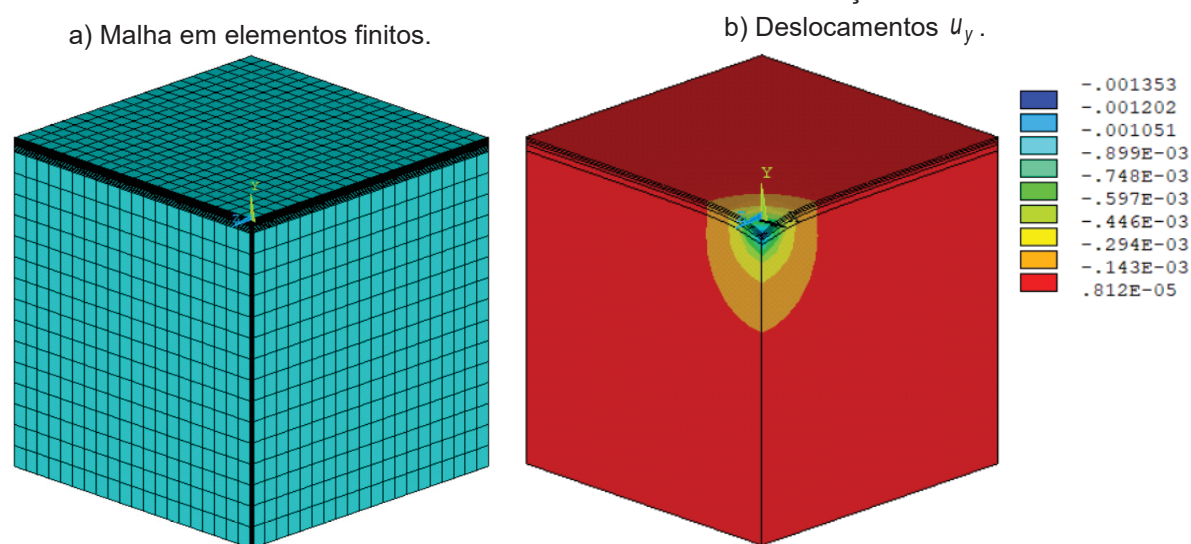
FONTE: O autor (2018).



De acordo com o modelo de validação A desta pesquisa, o limite radial da aplicação de carga para pavimentos aeroportuários deve ser praticamente igual à espessura do subleito. Portanto, o limite radial estabelecido por Duncan, Monismith e Wilson (1968) deve ser maior, para que haja mais precisão nos resultados finais. No caso da espessura do subleito (em se tratando da geometria finita), vale ressaltar que ocorre uma determinada variação nos resultados de deslocamentos, de acordo com a rigidez da fundação, sendo mais ou menos rígida, influenciando na resposta a ser obtida. Portanto, o parâmetro para determinação da espessura ideal, apresentado por Duncan, Monismith e Wilson (1968) na modelagem computacional, pode ser considerado válido para aplicação de pavimentos aeroportuários nesta pesquisa.

Assim, com base nos modelos analisados, foi adotado para este estudo um subleito com espessura mínima de 50 vezes o raio da área de aplicação da carga. Sabe-se que, com o aumento da espessura do subleito, as deflexões também aumentam, porém, de forma não significativa, como apresentado no modelo adicional A7 (TABELA 18 e FIGURA 48).

FIGURA 48 – MALHA EM ELEMENTOS FINITOS E DEFLEXÕES (DESLOCAMENTOS  $u_y$ ) NO PAVIMENTO FLEXÍVEL DO MODELO DE VALIDAÇÃO A7.



FONTE: O autor (2018).

Portanto, as dimensões do pavimento flexível utilizados nesta pesquisa, para análise dinâmica para o impacto das aeronaves no instante do pouso, são apresentados na TABELA 20.



TABELA 20 – DIMENSÕES DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL ADOTADO NA MODELAGEM DE ANÁLISE DINÂMICA.

Tipo de pavimento	Dimensões do pavimento flexível			
	Largura [m]	Comprimento [m]	Espessura do subleito [m]	Espessura total [m]
Flexível	24,00	24,00	12,00	13,30

FONTE: O autor (2018).

#### 4.3.1.2 Modelo computacional B

O modelo computacional B apresentou resultado satisfatório ao comparar com o trabalho de referência para validação do modelo. Pois essa diferença, entre o deslocamento vertical máximo, foi de 6,24%. No Apêndice B é apresentado o modelo de forma mais detalhada.

#### 4.3.2 Definição da geometria do modelo

Neste item são apresentadas as definições do modelo para análise dinâmica e estática, a fim de avaliar o impacto das AMP no instante do pouso. Para cada uma das simulações, foi considerada a carga de uma única roda das AMP individualmente (de modo que no conjunto das rodas que compõem o trem de pouso, os efeitos devem ser sobrepostos). A seguir são apresentadas as geometrias do pavimento flexível aeroportuário e do pneu aeronáutico usados na presente pesquisa.

##### 4.3.2.1 Estrutura do pavimento flexível

Através dos conceitos de pavimentação aeroportuária, das limitações atribuídas nesta pesquisa e das condições dos modelos de validação em elementos finitos, o pavimento aeroportuário flexível foi definido para o estudo do comportamento estrutural.

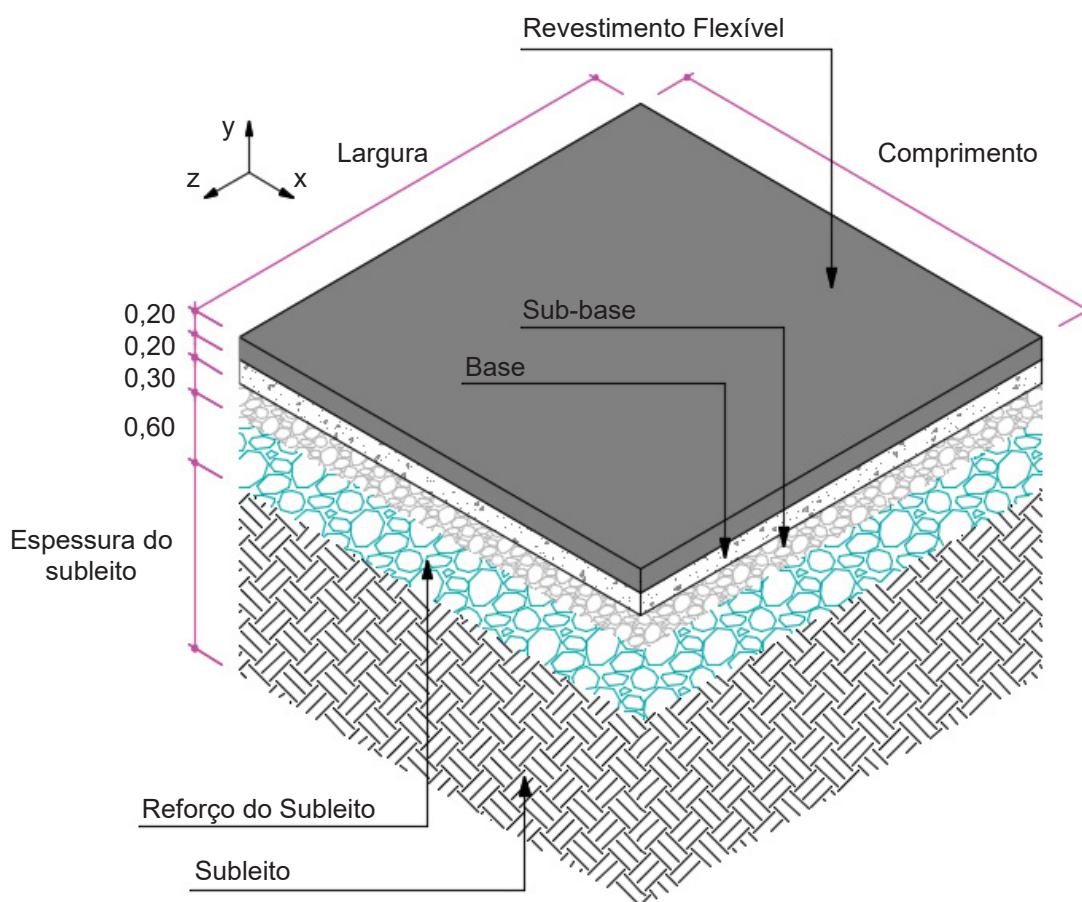
De acordo com as TABELAS 12 e 20 (item 4.2 e 4.3.1.1), referentes às características técnicas, propriedades dos materiais das camadas e dimensões da estrutura do pavimento flexível e subleito, a geometria atribuída na modelagem para as simulações das análises estáticas e dinâmicas são apresentadas na TABELA 21 e FIGURA 49.

TABELA 21 – CARACTERÍSTICAS DA GEOMETRIA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL AEROPORTUÁRIO PARA AS ANÁLISES ESTÁTICAS E DINÂMICAS.

Tipo de análise	Largura [m]	Comprimento [m]	Espessura do subleito [m]	Modelo construído
Estática	12	12	12	Com dupla simetria
Dinâmica	24	24	12	Sem simetria

FONTE: O autor (2018).

FIGURA 49 – GEOMETRIA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL AEROPORTUÁRIO PARA ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA DE IMPACTO, COM SUBLEITO DE 12 METROS DE ESPESSURA.



FONTE: O autor (2018).

Para as simulações das análises estáticas, como critério para desenvolvimento dos coeficientes de impacto, realizou-se um modelo através da dupla simetria, semelhante a modelagem computacional de validação A, com apenas a alteração das dimensões do pavimento flexível, devido a dupla simetria, mas mantendo a proporcionalidade com as dimensões da análise dinâmica. Para as simulações das análises dinâmicas explícita de impacto, de investigação do

comportamento estrutural do pavimento flexível aeroportuário, foi utilizado um modelo completo, sem simetria.

#### 4.3.2.2 Estrutura do pneu aeronáutico

Os pneus utilizados na aviação são essenciais para o conforto e segurança, com capacidade de suportar todo o peso da aeronave quando está em solo, em movimento ou parada, além de absorver a maior parte do impacto provocado pela aterrissagem (MICHELIN, 2018). Os pneus aeronáuticos possuem características diferentes dos outros tipos de pneus, pois devem atender à aderência e à grande flexibilidade, para que consigam suportar o peso elevado das aeronaves (MICHELIN; GOODYEAR, 2018).

Nesta pesquisa, o pneu aeronáutico foi modelado de acordo com a geometria real, compatível com as características técnicas dos fabricantes. Para isso, no presente trabalho, foram utilizados dois tipos de pneus aeronáuticos. As aeronaves da empresa Airbus (A380 e A340-600) utilizam, em seus trens de pousos principais, pneus aeronáuticos do tipo radial NZG, modelo 1400 x 530 R23 (FIGURA 50a). Já, as aeronaves da empresa Boeing (B747-8 e B777-300) utilizam, em seus trens de pousos principais, pneus aeronáuticos do tipo *Flight* radial, modelo 52 x 21 R22 (FIGURA 50b). A TABELA 22 apresenta as características dos pneus radiais dos trens de pousos principais das aeronaves estudadas na presente pesquisa.

FIGURA 50 – PNEUS RADIAIS AERONÁUTICOS.

a) Radial NZG.



b) *Flight* radial



FONTE: Michelin e Goodyear (2018).

TABELA 22 – CARACTERÍSTICAS DOS PNEUS RADIAIS AERONÁUTICOS.

Aeronaves	Diâmetro total [mm]	Largura nominal [mm]	Diâmetro do aro [mm]	Pressão de inflação sem carga [MPa]	Carga máxima estática por pneu [kN]	Velocidade máxima de decolagem [km/h]
A380	1.400	530	584,2	1,72	340	378
A340-600						
B747-8	1.320	533	558,8	1,57	300	378
B777-300						

FONTE: Adaptado da Michelin e Goodyear (2018).

Assim como as estruturas dos vários tipos de pneus radiais existentes, na aviação não é diferente, e o pneu aeronáutico radial é composto por uma estrutura do tipo multicamadas, como mostra a FIGURA 51 (MICHELIN, 2018).

FIGURA 51 – ESTRUTURA DO PNEU RADIAL AERONÁUTICO.



FONTE: Adaptado da Michelin (2018).

Estruturalmente, o pneu aeronáutico não difere muito do pneu automotivo. A parte em contato com o solo é definida como banda de rodagem. Os talões, reforçados com aço, garantem a fixação do pneu à roda. As paredes laterais, muito flexíveis nos pneus aeronáuticos, compõem a lateral do pneu. A estrutura interna é constituída por várias camadas de lonas reforçadas para suportar todo o peso das aeronaves (MICHELIN, 2018).

### 4.3.3 Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais empregados para a modelagem do pavimento aeroportuário foram apresentadas no item 4.2 (TABELA 12) deste capítulo. Para os pneus aeronáuticos, semelhante ao modelo de validação B, utilizou-se uma configuração mais simples, composta apenas pelo talão, parede lateral e banda de rodagem (FIGURA 51), como mostra a TABELA 23. Os parâmetros foram extraídos a partir do trabalho de Ghoreishy (2006).

TABELA 23 – ESTRUTURA DO PNEU RADIAL AERONÁUTICO.

Componentes da estrutura do pneu	$E$ [MPa]	$\nu$
Talão	200000	0,30
Parede lateral	3500	0,30
Banda de rodagem	3500	0,30

FONTE: Adaptado de Ghoreishy (2006).

Para as análises estáticas e dinâmicas, utilizaram-se materiais isotrópicos, com comportamento elástico linear, tanto para o pavimento aeroportuário, quanto para os pneus das aeronaves.

### 4.3.4 Modelos estático e dinâmico

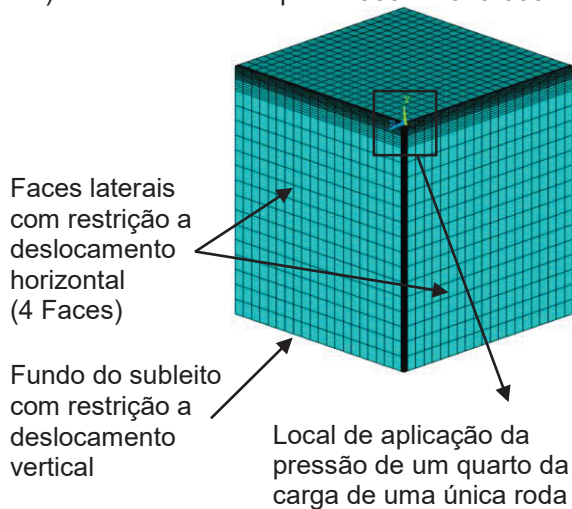
Para as análises estáticas, assim como no modelo de validação A, foi utilizado um elemento finito hexaédrico de oito nós e três graus de liberdade em cada nó (SOLID 45). Para as análises dinâmicas, um elemento finito similar foi utilizado na modelagem (SOLID 164, que foi o mesmo utilizado na validação B), porém este elemento possui, além dos deslocamentos, graus de liberdade para velocidades e acelerações. A malha adequada, para ambas as análises, foi obtida após diversas simulações, de forma que os resultados apresentassem determinada estabilidade. Na análise estática (através de um modelo com dupla simetria) foi utilizado o pavimento com uma malha de 20592 elementos finitos. No entanto, na análise dinâmica (sem simetria), foi utilizado para o pavimento uma malha com 52500 elementos finitos, e para o pneu foi utilizado uma malha de 1723 (A380 e A340-600) e 1658 (B747-8 e



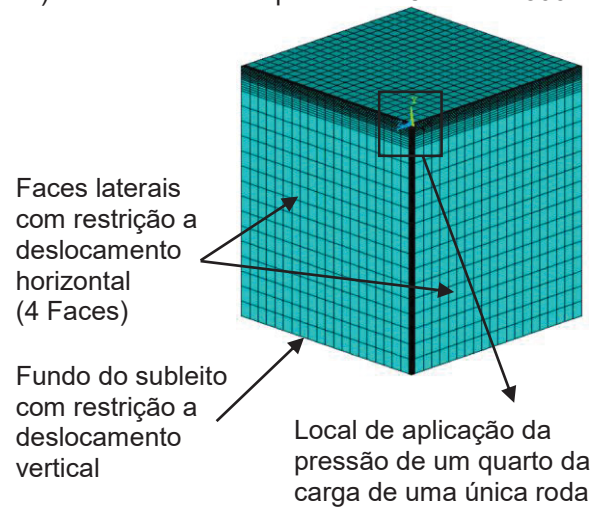
B777-300) elementos finitos. A FIGURA 52 mostra a quantidade e a malha de elementos finitos usadas nas modelagens.

FIGURA 52 – MALHA EM ELEMENTOS FINITOS COM AS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO ESTÁTICO E DINÂMICO DO ESTUDO.

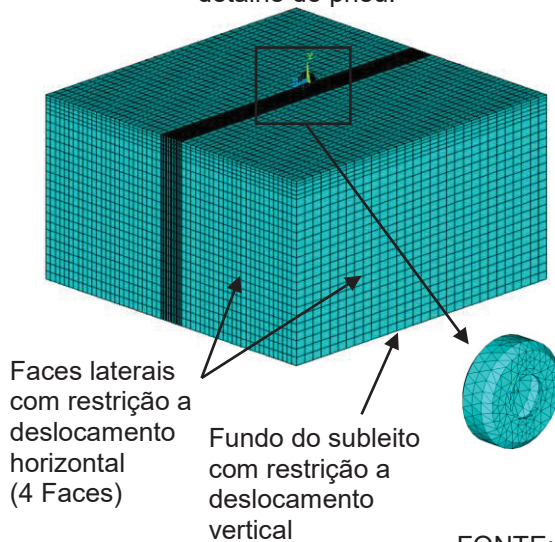
a) Análises estáticas para A380 e A340-600.



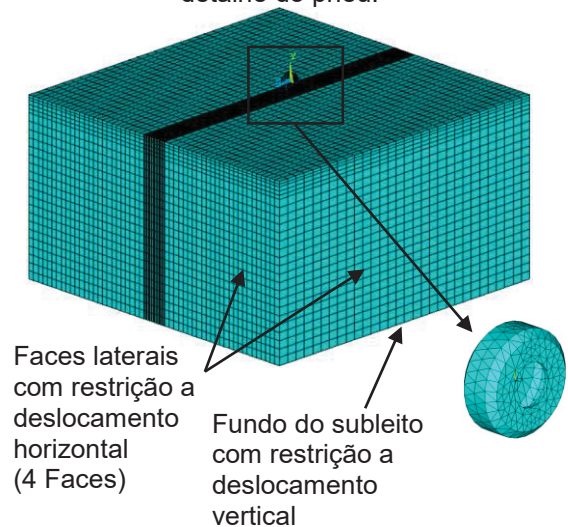
b) Análises estáticas para B747-8 e B777-300.



c) Análises dinâmicas para A380 e A340-600 e detalhe do pneu.



d) Análises dinâmicas B747-8 e B777-300 e detalhe do pneu.



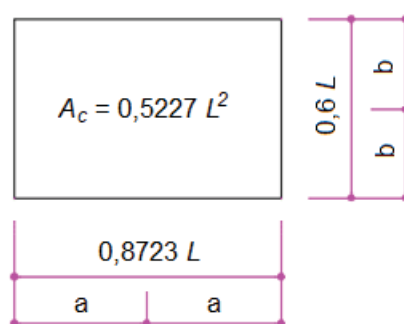
FONTE: O autor (2018).

O maior refinamento apresentado nas FIGURAS 52c e 52d justifica-se pois, à medida em que a carga na superfície do pavimento aeroportuário é localizada, torna-se necessária a modelagem de uma malha mais refinada próximo a área solicitada, para obtenção de valores mais precisos de tensão, deformação e deslocamentos (SAAD, MITRI e POOROOSHASB, 2005).

Para a modelagem numérica do problema estático, foram consideradas as condições de contorno utilizadas no modelo de validação A. Para o carregamento, aplicou-se a pressão de contato sobre uma área equivalente ao de um pneu aeronáutico, como apresentados na FIGURA 35 do item 4.3.1.1. No entanto, para minimizar o esforço computacional no processo de cálculo (análise estática), foi modelado apenas um quarto da área de contato, como mostra a TABELA 24, com as respectivas áreas de contato para cada aeronave.

TABELA 24 – ÁREA DE CONTATO PROVOCADO PELA CARGA E PRESSÃO DAS AERONAVES

Tipo de aeronave	PP [MPa]	Carga por roda trem de pouso principal (análise estática) [kN]	$A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$L$ [m]	$a = \frac{0,8712L}{2}$ [m]	$b = \frac{0,6L}{2}$ [m]
A380	1,50	273	0,18	0,60	0,26	0,18
A340-600	1,53	300	0,20	0,61	0,27	0,18
B747-8	1,52	266	0,17	0,58	0,25	0,17
B777-300	1,52	278	0,18	0,59	0,26	0,18

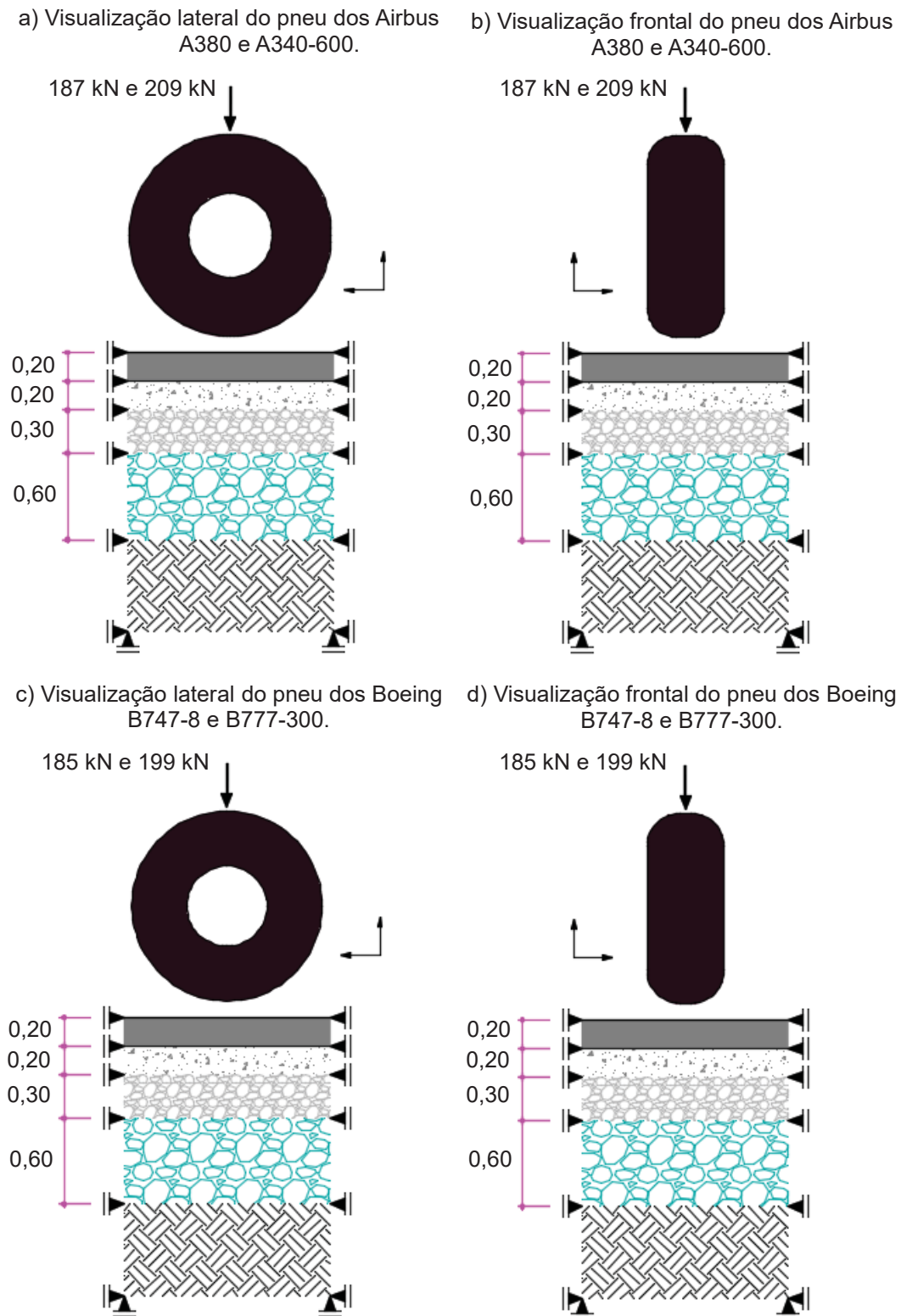


FONTE: Adaptado de Huang (1993); Adaptado da Airbus, Boeing e ANSYS (2017).

Com o auxílio da dupla simetria, através da aplicação de um quarto da área de contato da carga da aeronave, o modelo estrutural foi discretizado com as seguintes condições de contorno, onde as faces paralelas das camadas do pavimento aeroportuário nas direções x e z foram restringidas para deslocamentos horizontais, e o fundo do subleito restringido para deslocamentos verticais (semelhante ao modelo de validação A, FIGURA 37 seção 4.3.1.1).

No caso das análises dinâmicas, realizaram-se os procedimentos e critérios semelhantes ao modelo de validação B, porém, para uma análise de impacto no instante do pouso. Para condição do carregamento, aplicaram-se as respectivas cargas para uma única roda das aeronaves (FIGURA 53).

FIGURA 53 – DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM METROS).



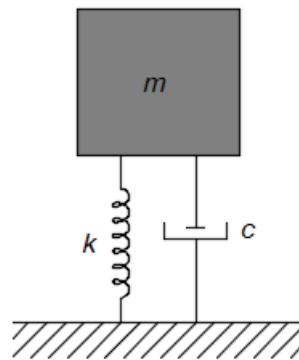
FONTE: O autor (2018).

No modelo dinâmico, essas cargas foram definidas como uma massa  $m$ , através de um sistema de um grau de liberdade, que é considerado como o sistema



dinâmico mais simples, para modelar a carga de impacto provocada pela aeronave. Além da massa  $m$ , o sistema de um grau de liberdade possui uma rigidez  $k$  e um amortecimento  $c$  (FIGURA 54) (CHOPRA, 1995).

FIGURA 54 – SISTEMA DE UM GRAU DE LIBERDADE MASSA, MOLA E AMORTECEDOR.



FONTE: Adaptado de Chopra (1995).

Apesar de conhecida a relevância do amortecimento do trem de pouso (MODARRES; SHABANI, 2015), no presente trabalho não foi considerado o amortecimento  $c$  do trem de pouso e nem a rigidez  $k$  da aeronave visando explorar, inicialmente, um modelo mais simplificado. Estudos posteriores nesta linha de pesquisa no grupo, no entanto, poderão incluir modelos de comportamento mais avançado.

Como já mencionado no capítulo 4, o trem de pouso de uma aeronave pode ser representado por uma combinação de molas (rigidez  $k$ ) e amortecedores (amortecimento  $c$ ) com a capacidade de suportar a estrutura de uma aeronave e reduzir as cargas de impacto no instante do pouso, mantendo a estabilidade e facilitando o controle da aeronave de forma a proporcionar conforto aos passageiros (FAA, 2009; BOEING, 2016; CURREY, 1998).

De acordo com Ross e Edson (1983), Sivakumar e Haran (2015), Krazon e Malachowski (2015), Sivakumar (2016) e Stephen et al. (2016) a rigidez e o amortecimento produzem forças reativas que minimizam o impacto das aeronaves no instante do pouso.

Como no modelo computacional desta pesquisa foi modelado um sistema apenas como uma massa, devido ao objetivo do estudo, uma forma de considerar os parâmetros  $k$  e  $c$  seria através da redução da massa em função das forças reativas.

Portanto, nesta pesquisa não foi considerada nenhuma redução como forma de aplicação destes parâmetros.

A TABELA 25 apresenta percentuais de redução da carga de pouso para considerar a aplicação da rigidez e do amortecimento em trabalhos futuros de acordo com o modelo computacional implementado nesta pesquisa.

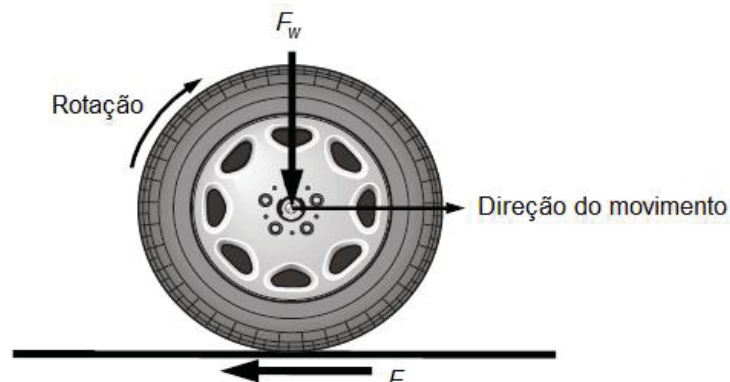
TABELA 25 – PERCENTUAL DE REDUÇÃO DA CARGA COM APLICAÇÃO DA RIGIDEZ  $k$  E AMORTECIMENTO  $c$  POR DIVERSOS PESQUISADORES.

Pesquisadores	Ano de publicação	Tipo de aeronave	Tipo de trem de pouso	Redução da carga de pouso [%]
Ross e Edson	1983	A - 10	-	43
Sivakumar e Haran	2015	Fokker 50	-	87
Krazon e Malachowski	2015	Aeronave militar	-	90
Sivakumar	2016	-	Roda única	95
Stephen et al.	2016	Pequeno porte	Triciclo	95

FONTE: O autor (2018).

Para as análises dinâmicas do contato pneu-pavimento há também uma força que resiste ao movimento relativo entre o pneu e a superfície do pavimento, conhecido como atrito (ou resistência ao rolamento). Esta força resistiva ( $F$ ), ilustrada na FIGURA 55, é gerada quando o pneu rola ou desliza sobre a superfície do pavimento (HALL; SMITH; TITUS-GLOVER, 2009).

FIGURA 55 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE FORÇAS ATUANDO EM UMA RODA.



FONTE: Adaptado de Hall, Smith e Titus-Glover (2009).

O coeficiente de atrito adimensional  $\mu$ , é dado pela relação entre a força de atrito tangencial  $F$ , entre a área de contato do pneu com o pavimento, a superfície

horizontal percorrida e a força perpendicular ou carga vertical  $F_w$ , como mostra a equação (25).

$$\mu = \frac{F}{F_w} \quad (25)$$

O coeficiente de atrito para pistas de aeroportos varia de acordo com o tipo de superfície em que o pneu está em contato e suas condições climáticas (TABELA 26) (HALL; SMITH; TITUS-GLOVER, 2009; MODARRES; SHABANI, 2015).

TABELA 26 – COEFICIENTE DE ATRITO PARA PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO.

Tipo de pavimento aeroportuário	Condições climáticas			
	Seco	Molhado	Neve	Congelado
Flexível	0,85	0,65	0,25	0,10

FONTE: Adaptado de Hall, Smith e Titus-Glover (2009); Modarres e Shabani (2015).

Nesta pesquisa, foi considerada a condição climática do tipo molhado para a realização das análises dinâmicas, uma vez que nos aeroportos nacionais este é o valor que mais se aproxima do valor encontrado em ensaios, mesmo nas situações de condições climáticas do tipo seco.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas neste estudo, para as análises estáticas e dinâmicas. Portanto, serão discutidos e comparados os resultados entre essas análises.

5.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES ESTÁTICAS

As análises estáticas simulam o momento em que as aeronaves não estão em movimento, sobre a pista do aeroporto, e com o peso bruto máximo de decolagem. A TABELA 27 apresenta as deflexões máximas causadas pelas aeronaves em estudo, assumindo o caso estático. Essas deflexões foram calculadas em três localizações: na superfície do revestimento flexível, no topo da base (fundo do revestimento flexível) e no topo do subleito, como mostra a FIGURA 56.

TABELA 27 – DEFLEXÕES (DESLOCAMENTOS  $u_y^{e,máx.}$ ) NAS CAMADAS: ANÁLISE ESTÁTICA.

Modelo de análise estática por aeronave	$u_y^{e,máx.}$ [mm]		
	Na superfície do revestimento flexível	No fundo do revestimento flexível	No topo do SL
A380	- 1,36	- 1,25	- 0,91
A340-600	- 1,43	- 1,33	- 0,97
B747-8	- 1,27	- 1,16	- 0,84
B777-300	- 1,38	- 1,27	- 0,93

FONTE: O autor (2018).

FIGURA 56 – RESPOSTA EM TERMOS DAS DEFLEXÕES (DESLOCAMENTO  $u_y$ ) DA ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM METROS).

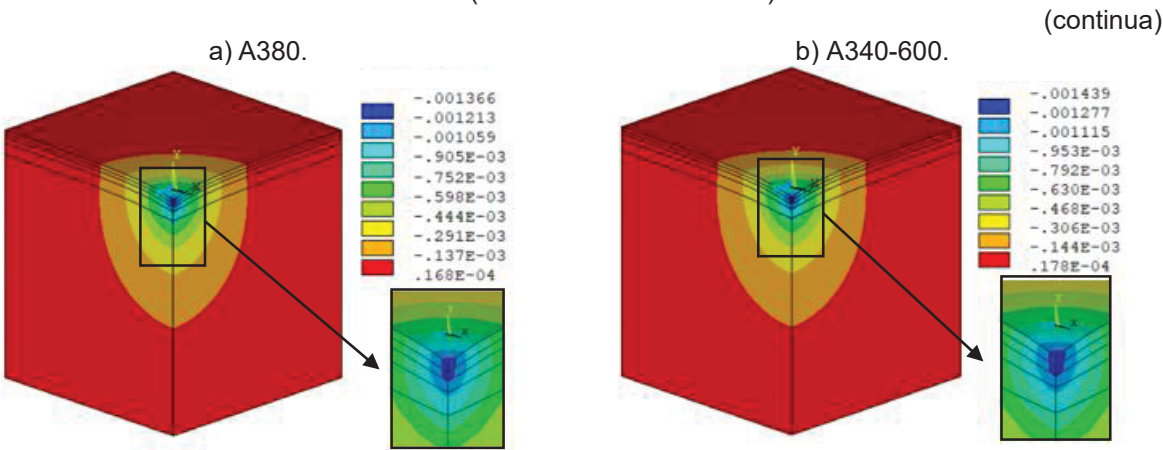
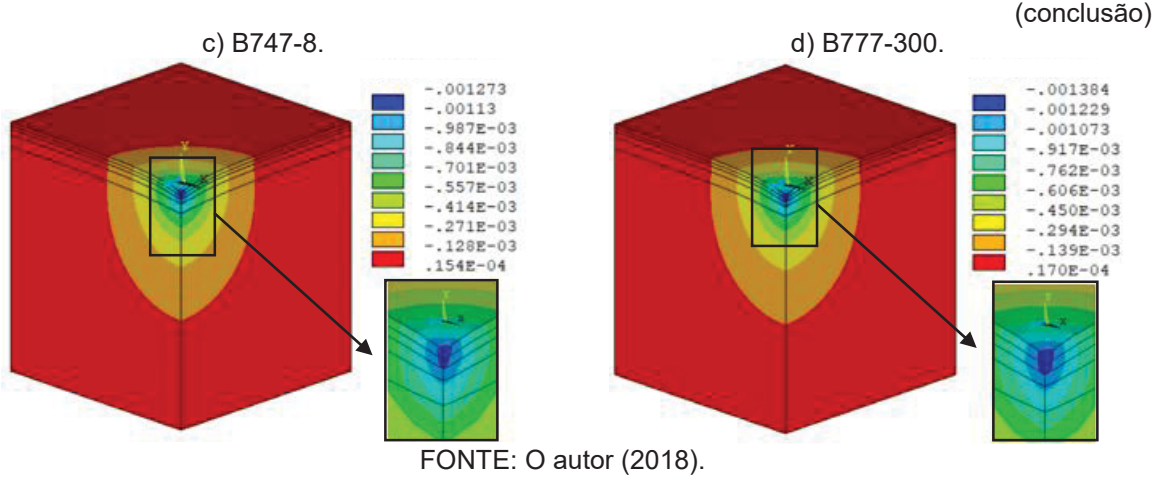


FIGURA 56 – RESPOSTA EM TERMOS DAS DEFLEXÕES (DESLOCAMENTO  $u_y$ ) DA ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM METROS).



A TABELA 28 e as FIGURAS 57, 58 e 59 apresentam as tensões horizontais e verticais localizadas no pavimento aeroportuário.

TABELA 28 – TENSÕES MÁXIMAS NO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO: ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM MEGAPASCAL).

Modelo de análise estática por aeronave	Na superfície do revestimento flexível			No fundo do revestimento flexível (topo da base)			No fundo da base (topo da sub-base)		
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$
A380	- 1,54	- 1,58	- 1,49	- 0,75	- 1,03	- 0,80	0,74	- 0,23	0,70
A340-600	- 1,59	- 1,62	- 1,53	- 0,77	- 1,05	- 0,83	0,77	- 0,24	0,73
B747-8	- 1,54	- 1,58	- 1,48	- 0,70	- 1,00	- 0,75	0,69	- 0,21	0,66
B777-300	- 1,56	- 1,60	- 1,51	- 0,75	- 1,03	- 0,80	0,75	- 0,23	0,71

FONTE: O autor (2018).

FIGURA 57 – TENSÕES  $\sigma_x$  DA ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM PASCAL).

(continua)

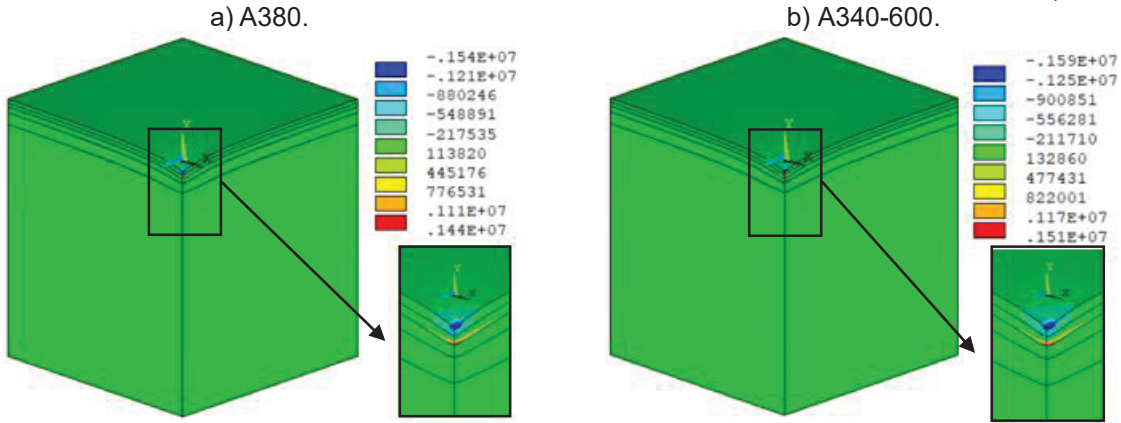
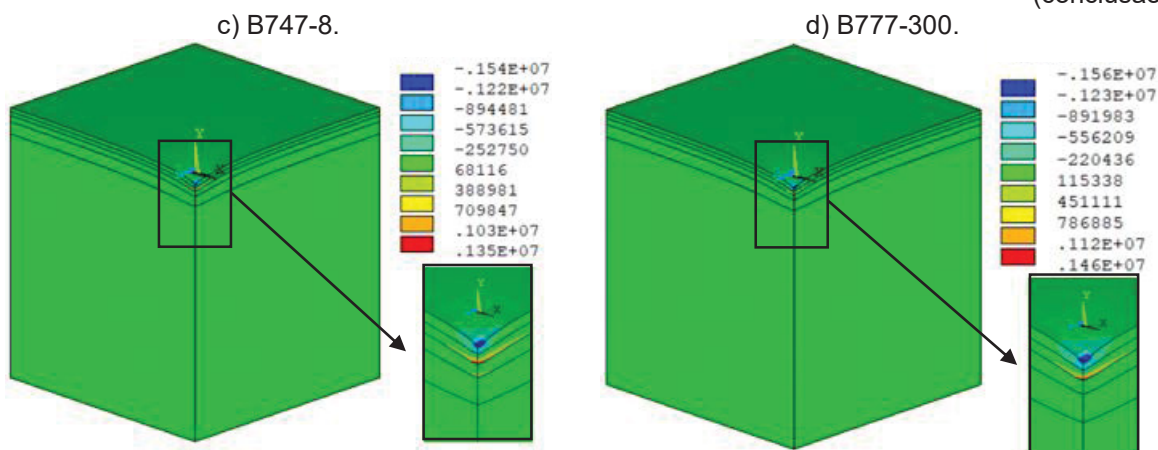
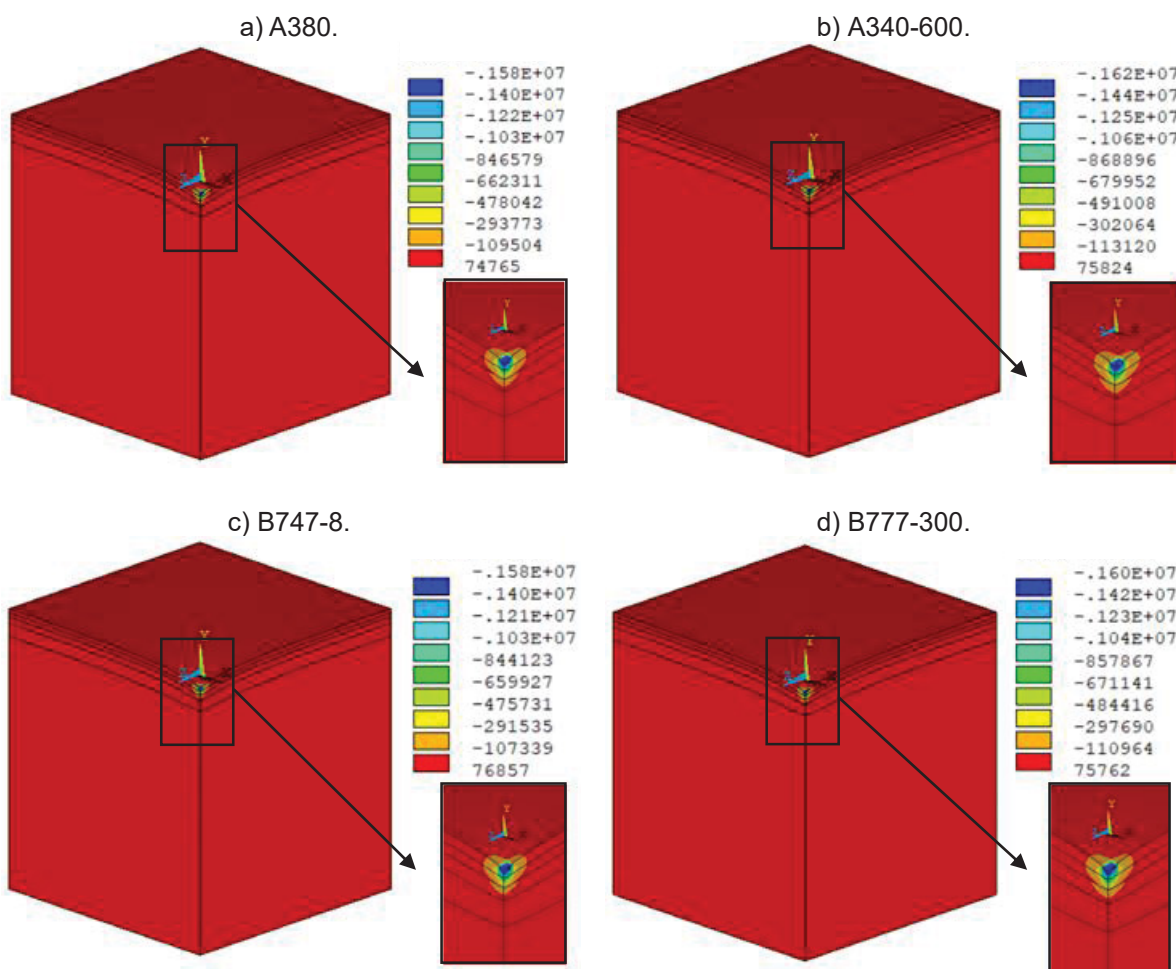


FIGURA 57 – TENSÕES  $\sigma_x$  DA ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM PASCAL)

(conclusão)

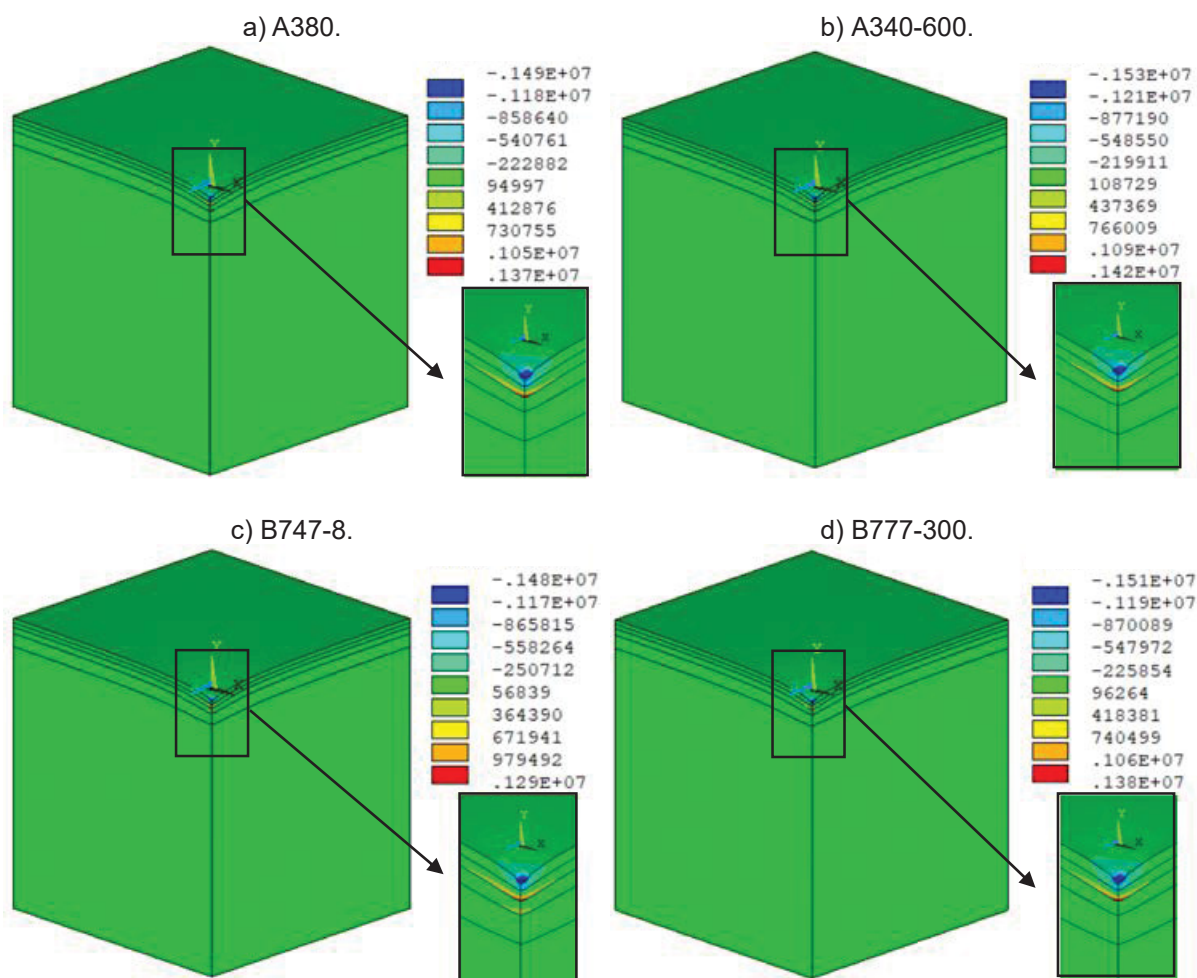


FONTE: O autor (2018).

FIGURA 58 – TENSÕES  $\sigma_y$  DA ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM PASCAL).

FONTE: O autor (2018).



FIGURA 59 – TENSÕES  $\sigma_z$  DA ANÁLISE ESTÁTICA (UNIDADE EM PASCAL).

FONTE: O autor (2018).

Através das análises dos dados e figuras anteriormente apresentados, foi possível observar que o maior e menor deslocamento vertical (deflexão) no pavimento aeroportuário (-1,43 mm e -1,27 mm respectivamente) foram provocados pelas aeronaves A340-600 e B747-8, representando uma diferença de 12,60%. Já o Airbus A380, que é a maior aeronave comercial para o transporte de passageiros no mundo voando hoje considerada como uma AMP dentre as aeronaves utilizadas nesta pesquisa, provocou um deslocamento vertical máximo de -1,36 mm. No entanto, o B777-300, que é outra aeronave, porém menor que o Airbus A380, provocou deslocamento vertical máximo de -1,38 mm. Portanto, essas duas aeronaves provocam um comportamento estrutural semelhante no pavimento aeroportuário (a diferença entre estes valores foi de apenas 1,47%).

Para as análises das tensões horizontais e vertical na superfície do revestimento flexível, no topo da base e no topo da sub-base do pavimento

aeroportuário, observou-se que os maiores valores foram provocados pelo Airbus A340-600. No entanto, os menores valores foram provocados pelas aeronaves B747-8 e A380 (tensões horizontais e vertical), o que pode ser explicado pela boa distribuição do peso sobre um grande número de rodas (TABELA 7 e 8 da seção 4.1.5, respectivamente). Lembrando que foram consideradas análises para apenas uma roda do trem de pouso principal das aeronaves, uma vez que deve ser levado em consideração a superposição dos efeitos gerados pelas demais rodas.

Ao comparar as tensões horizontais de compressão máximas e mínimas (A340-600 e B747-8 respectivamente) na superfície do revestimento flexível, observou-se que as diferenças foram de 3,25% e 3,37%. Para a tensão vertical de compressão (neste caso na superfície do revestimento flexível), que é uma das mais analisadas dentre as tensões na área de pavimentos, segundo Mahony et al. (2000) e Bernucci et al. (2010), percebeu-se que a diferença dos valores máximos e mínimos provocados pelo A340-600 e B747-8 foi de 2,53%.

## 5.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DINÂMICAS

As análises dinâmicas de impacto consistem no momento exato em que as aeronaves realizam o procedimento de pouso sobre a pista de aeroporto, tocando-a. No modelo numérico, isso significou que o estudo iniciou a 1 mm de altura sobre o pavimento, no instante antes de tocá-lo e finalizando após percorrer 12 m (ou aproximadamente 0,16 segundos). Como não foram utilizados os parâmetros de rigidez das aeronaves e os correspondentes amortecimentos dos trens de pousos, as análises dinâmicas apresentadas consideraram situações mais críticas do que as que podem ocorrer no processo de pouso.

As simulações foram realizadas considerando um determinado instante (TABELA 29) para percorrer uma distância referente à velocidade em que as aeronaves possuem no processo de pouso. Esse instante foi obtido através da equação (26).

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (26)$$

onde,  $V$ ,  $\Delta S$  e  $\Delta t$  são as respectivas velocidade, distância percorrida e o tempo real de execução das análises numéricas.



TABELA 29 – TEMPO REAL E COMPUTACIONAL DAS SIMULAÇÕES DAS ANÁLISES DINÂMICAS.

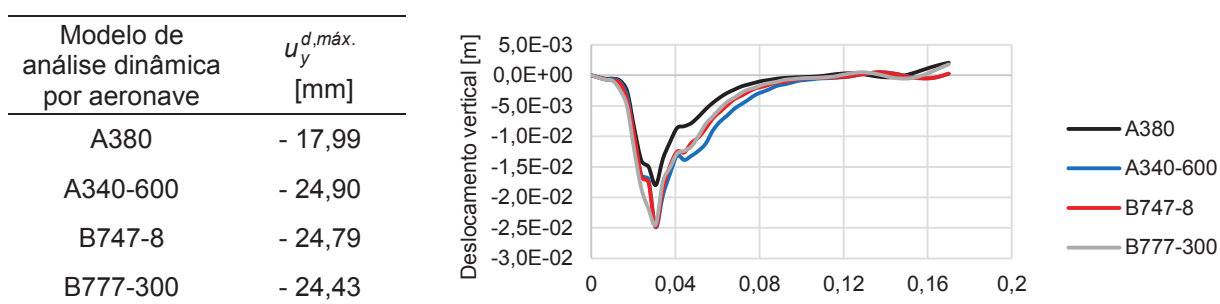
Tipo de aeronave	$V_p$ [km/h]	$V_p^x$ [km/h]	$V_p^y$ [km/h]	$\Delta S$ [m]	Tempo real	Tempo de simulação computacional [h]	Tempo que ocorre o deslocamento máximo [s]
					$\Delta t = \frac{\Delta S}{V_p^x}$ [s]		
A380	256	255,65	13,39	12	0,16898	18	0,0306
A340-600	283	282,61	14,81	12	0,15286	16	0,0270
B747-8	284	283,61	14,86	12	0,15232	25	0,0270
B777-300	278	277,62	14,54	12	0,15560	28	0,0288

Notas:  $V_p^x$  = Velocidade de pouso horizontal,  $V_p^y$  = Velocidade de pouso vertical, h = Horas.

FONTE: O autor (2018).

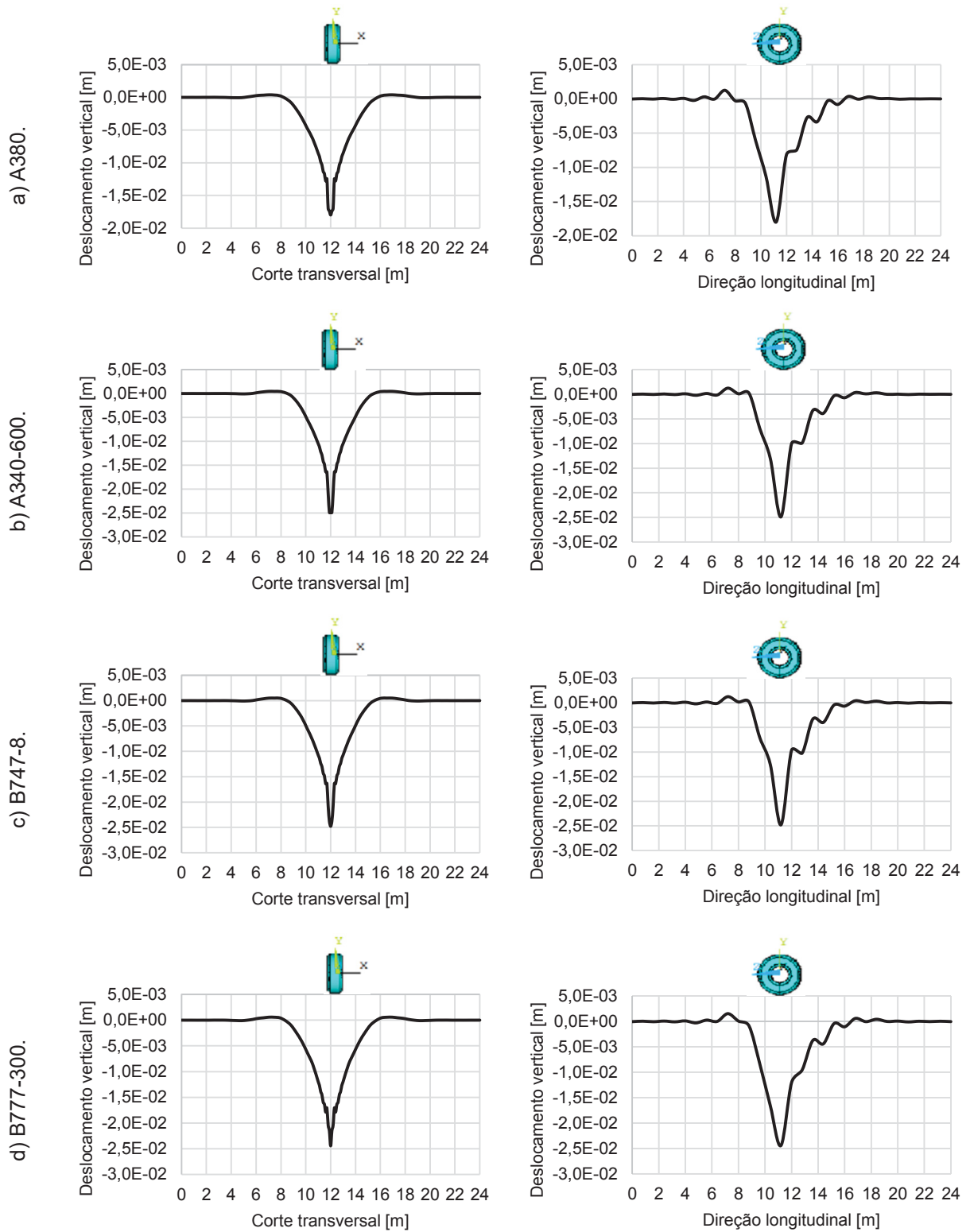
A TABELA 29 apresenta o cálculo do tempo real e computacional das simulações referentes às aeronaves consideradas neste estudo. O tempo real foi definido como o tempo que a aeronave demora para realizar o procedimento de pouso em escala real (percorrendo 12 m na pista do aeroporto). No entanto, o tempo computacional é o tempo de processamento que o *software* demora para realizar todos os cálculos e apresentar os resultados das simulações. E o tempo que ocorre o deslocamento (deflexão) máximo é referente ao instante de tempo extraído da análise numérica, porém, para o instante real do procedimento de pouso. O modelo de máquina (PC) utilizado na modelagem foi um processador Intel® Core™ i7-6700HQ CPU 2.6GHz com memória RAM de 8,00 GB.

A TABELA 30 e a FIGURA 60 apresentam as deflexões máximas na superfície do revestimento flexível ao longo do tempo (referente aos nós que possuem os deslocamentos verticais máximos) e nas direções transversais e longitudinais que ocorrem no pavimento aeroportuário. As FIGURAS 61, 62, 63 e 64 mostram os momentos exatos em que esses deslocamentos ocorrem durante o processo de pouso das aeronaves.

TABELA 30 – DEFLEXÃO (DESLOCAMENTOS  $u_y^{d,máx.}$ ) NA SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO FLEXÍVEL DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO: ANÁLISES DINÂMICAS.

FONTE: O autor (2018).

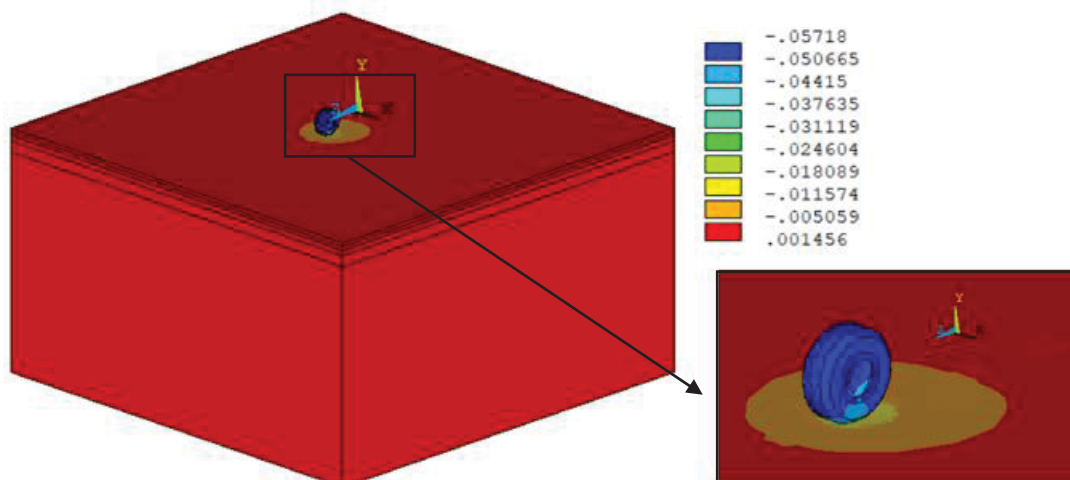
FIGURA 60 – DEFLEXÕES (DESLOCAMENTOS  $u_y^{d,máx.}$ ) MÁXIMAS DOS NÓS MAIS SOLICITADOS NA SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO FLEXÍVEL AO LONGO DO TEMPO. DIREÇÃO TRANSVERSAL E LONGITUDINAL NO INSTANTE DO POUSO DAS AERONAVES.



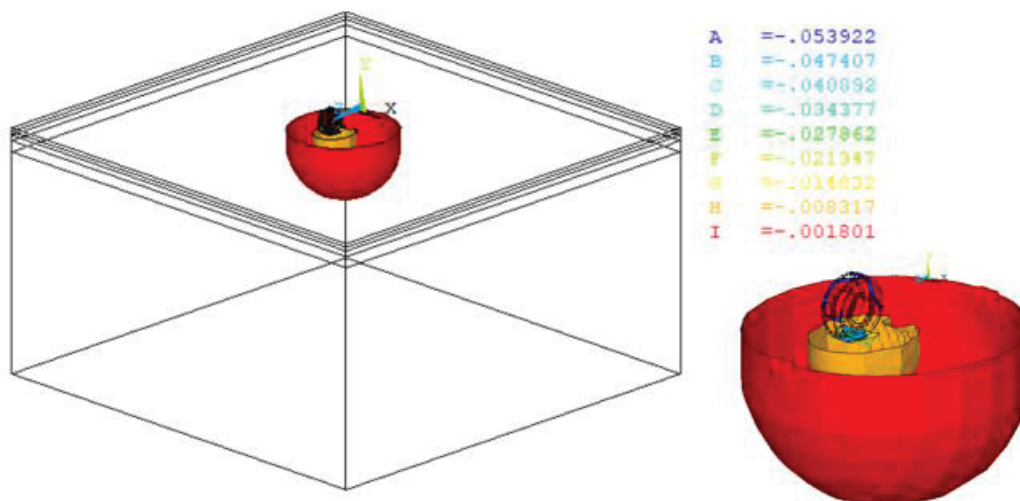
FONTE: O autor (2018).

FIGURA 61 – DESLOCAMENTO VERTICAL DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO PARA O A380 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM METROS).

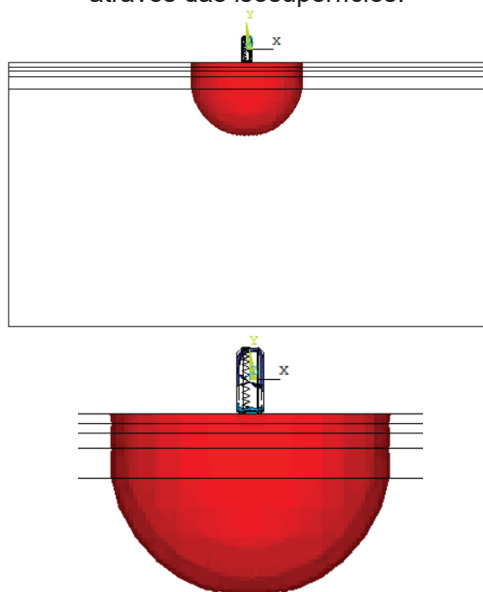
a) 3D do instante de deslocamento vertical máximo.



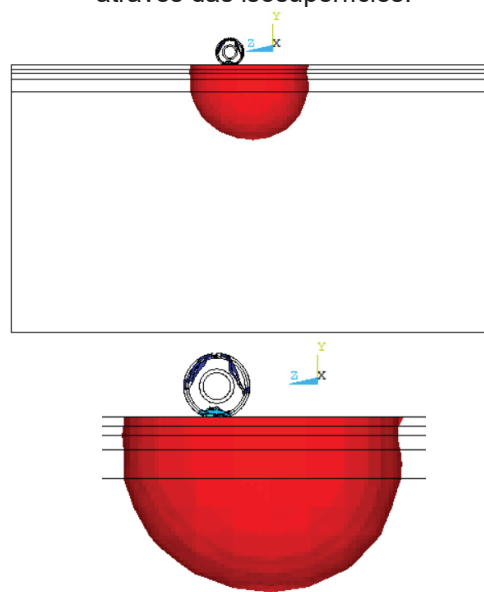
b) 3D do instante de deslocamento vertical máximo através das isosuperfícies.



c) 2D em vista ao longo da direção transversal através das isosuperfícies.



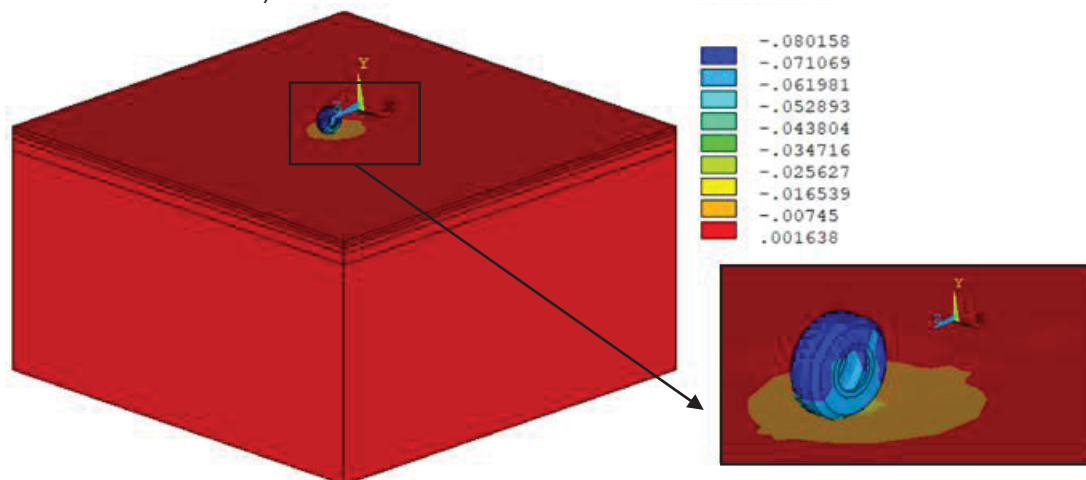
d) 2D em vista ao longo da direção longitudinal através das isosuperfícies.



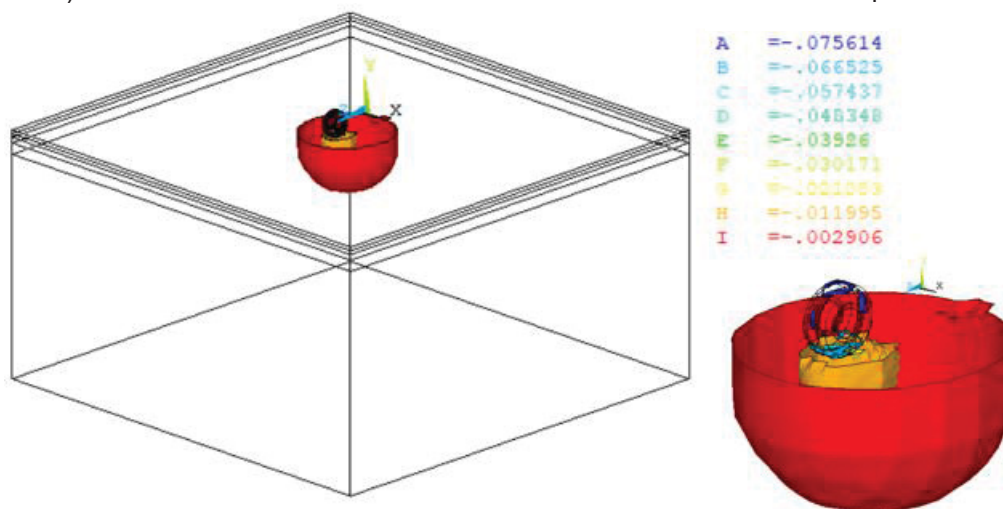
FONTE: O autor (2018).

FIGURA 62 – DESLOCAMENTO VERTICAL DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO PARA O A340-600 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM METROS).

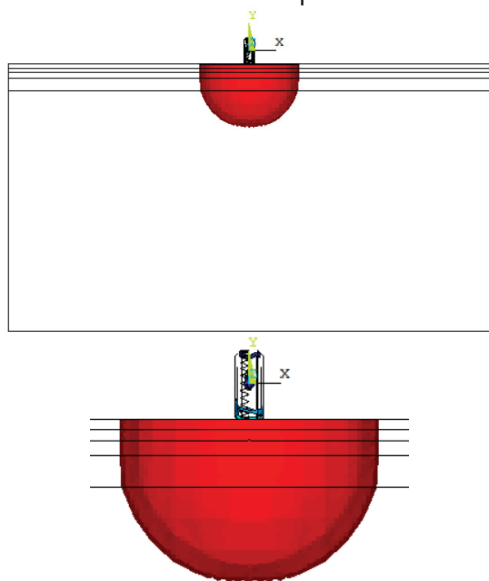
a) 3D do instante de deslocamento vertical máximo.



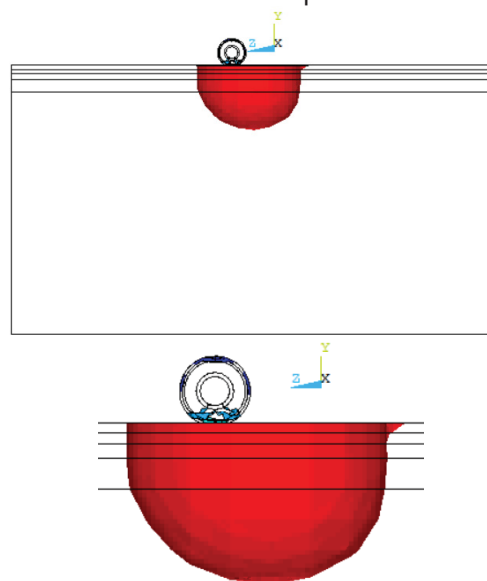
b) 3D do instante de deslocamento vertical máximo através das isosuperfícies.



c) 2D em vista ao longo da direção transversal através das isosuperfícies.



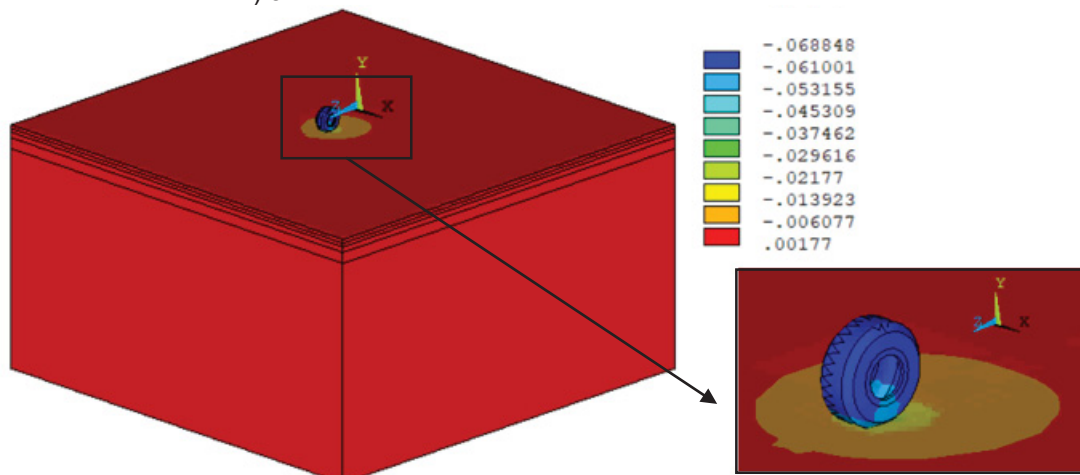
d) 2D em vista ao longo da direção longitudinal através das isosuperfícies.



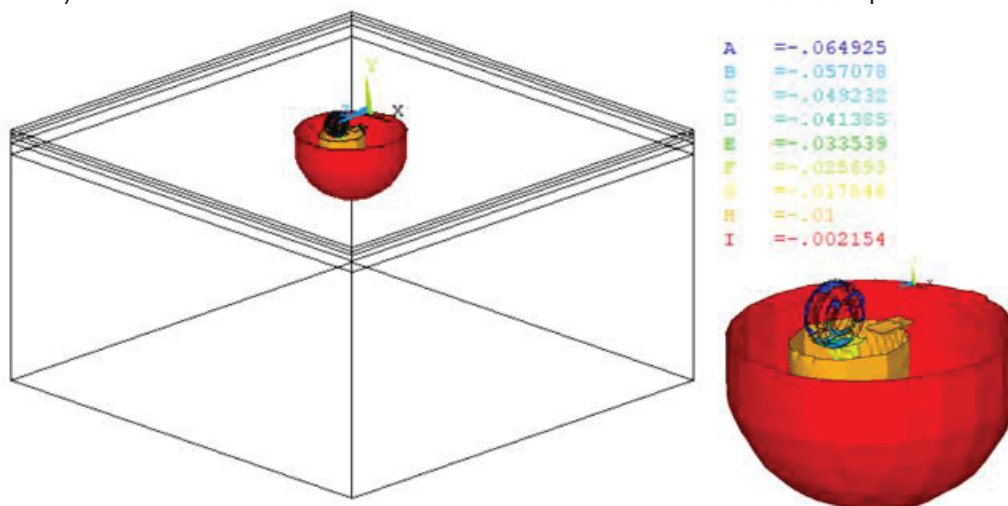
FONTE: O autor (2018).

FIGURA 63 – DESLOCAMENTO VERTICAL DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO PARA O B747-8 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM METROS).

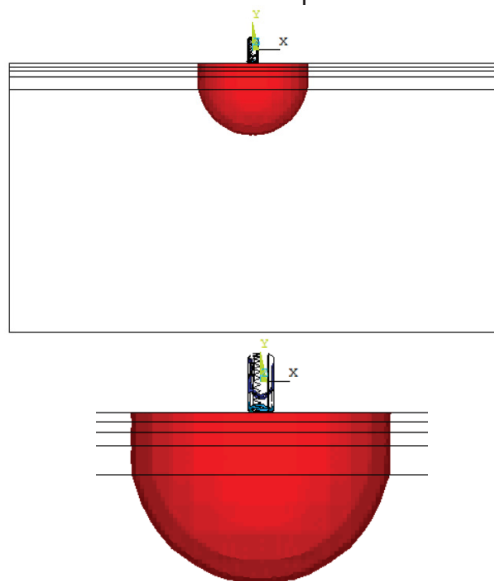
a) 3D do instante de deslocamento vertical máximo.



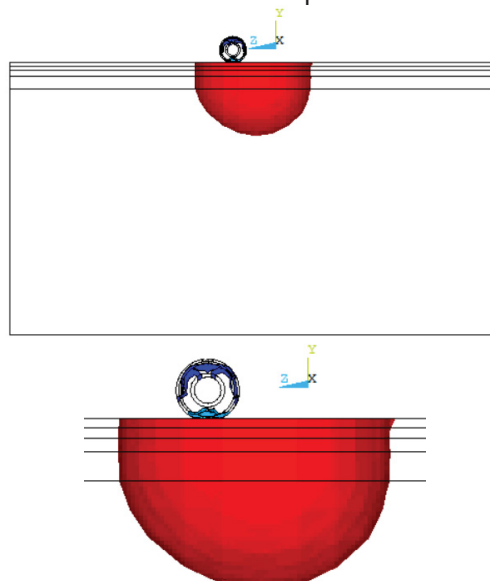
b) 3D do instante de deslocamento vertical máximo através das isosuperfícies.



c) 2D em vista ao longo da direção transversal através das isosuperfícies.



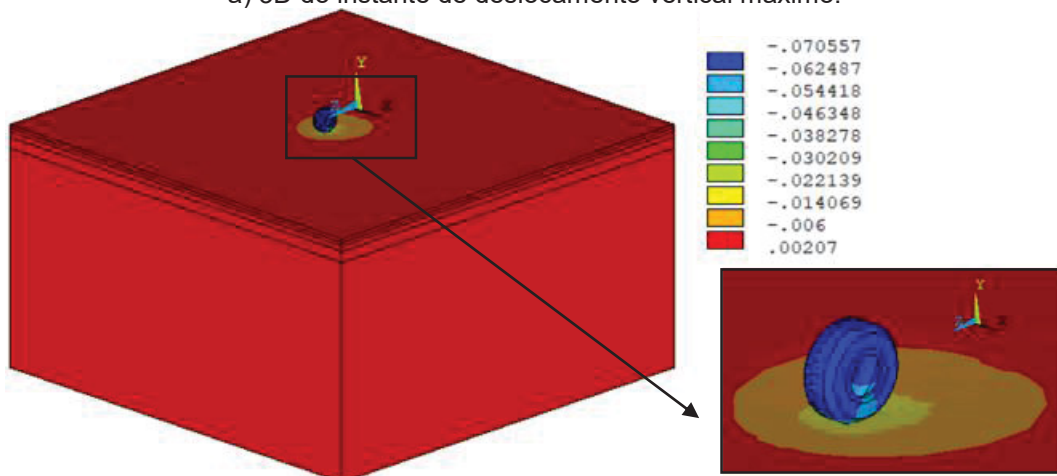
d) 2D em vista ao longo da direção longitudinal através das isosuperfícies.



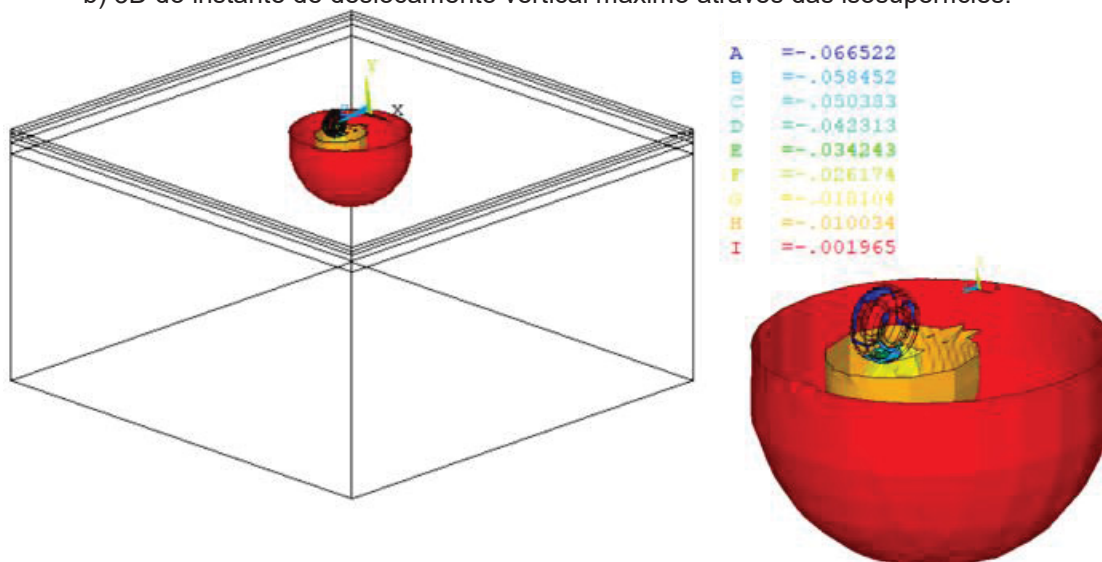
FONTE: O autor (2018).

FIGURA 64 – DESLOCAMENTO VERTICAL DO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO PARA O B777-300 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM METROS).

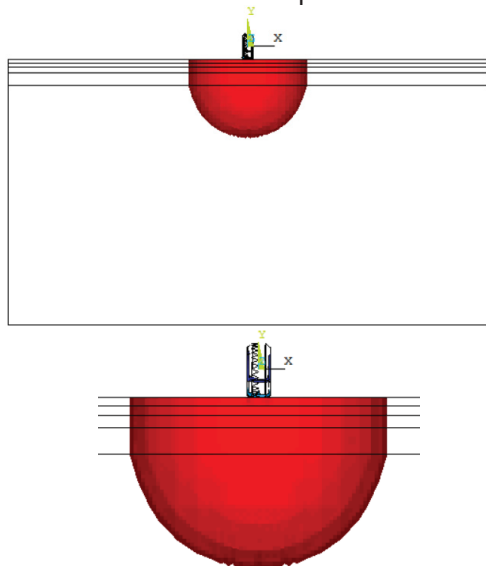
a) 3D do instante de deslocamento vertical máximo.



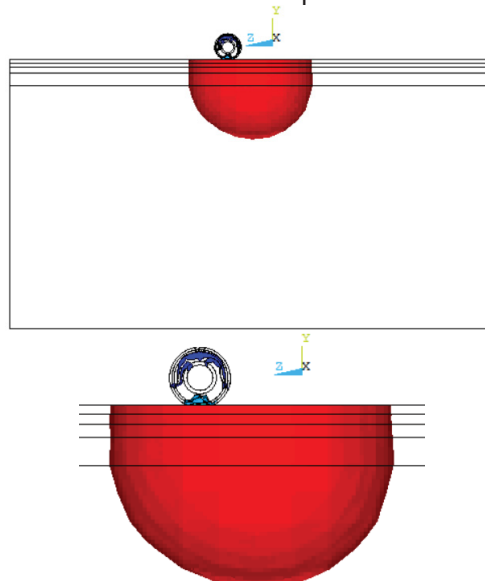
b) 3D do instante de deslocamento vertical máximo através das isosuperfícies.



c) 2D em vista ao longo da direção transversal através das isosuperfícies.



d) 2D em vista ao longo da direção longitudinal através das isosuperfícies.



FONTE: O autor (2018).



A TABELA 31 apresenta os valores máximos das tensões horizontais e verticais de compressão e tração do pavimento aeroportuário, para as análises dinâmicas.

TABELA 31 – TENSÕES MÁXIMAS PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO NA SUPERFÍCIE E NO FUNDO (TOPO DA BASE) DO REVESTIMENTO FLEXÍVEL PARA AS ANÁLISES DINÂMICAS.

Modelo de análise estática por aeronave	$\sigma_x$ [MPa]				$\sigma_y$ [MPa]				$\sigma_z$ [MPa]			
	Superfície		Fundo		Superfície		Fundo		Superfície		Fundo	
	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração
A380	- 6,7	0,6	- 2,1	0,3	- 5,9	0,5	- 4,5	0,4	- 5,9	1,3	- 2,2	0,5
A340-600	- 10,0	0,9	- 3,7	0,5	- 8,1	0,7	- 6,3	0,5	- 8,9	1,8	- 3,3	0,8
B747-8	- 9,7	0,9	- 3,0	0,4	- 7,8	0,6	- 6,0	0,5	- 8,6	1,7	- 3,1	0,7
B777-300	- 9,4	0,8	- 3,0	0,4	- 8,0	0,7	- 6,0	0,5	- 8,7	1,7	- 3,2	0,8

FONTE: O autor (2018).

Para as tensões horizontais e verticais de compressão, esses valores estão localizados próximos ao nó do deslocamento vertical máximo (localizado na superfície do revestimento flexível), no entanto, para as tensões verticais e horizontais de tração, esses valores se encontram distantes deste respectivo nó, e também estão presentes na superfície e no fundo do revestimento flexível.

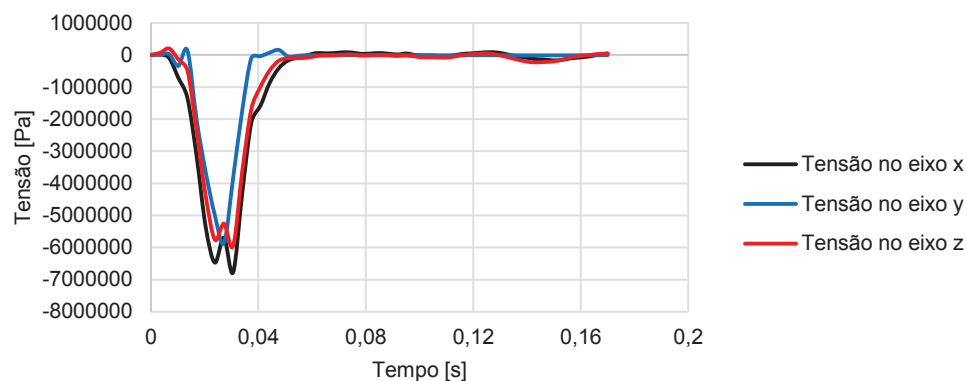
As respostas em termos de tensões apresentam picos de tração e compressão durante o processo de pouso das aeronaves em estudo.

A FIGURA 65 apresenta as tensões horizontais e verticais ao longo do tempo, que ocorrem no pavimento aeroportuário, para os nós mais solicitados na superfície do revestimento flexível.

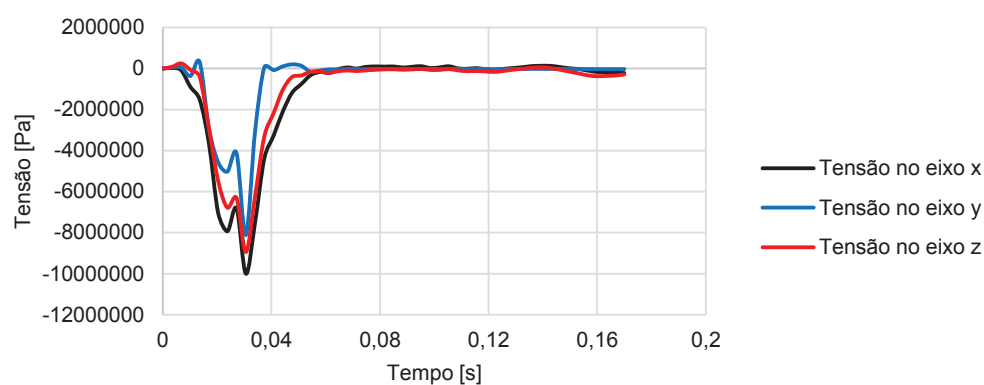
As FIGURAS 66, 67, 68 e 69 mostram os momentos exatos em que ocorrem as tensões verticais máximas, de compressão e tração, durante o processo de pouso das aeronaves. São apresentadas apenas as figuras dessas tensões, uma vez que, na análise de pavimentos, essas tensões são uma das mais importantes.

FIGURA 65 – TENSÕES MÁXIMAS DOS NÓS MAIS SOLICITADOS AO LONGO DO TEMPO NO INSTANTE DO POUSO DAS AERONAVES.

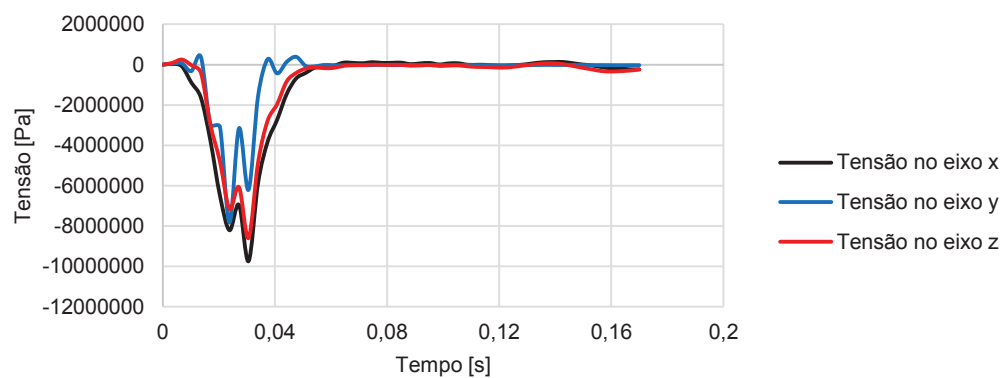
a) A380.



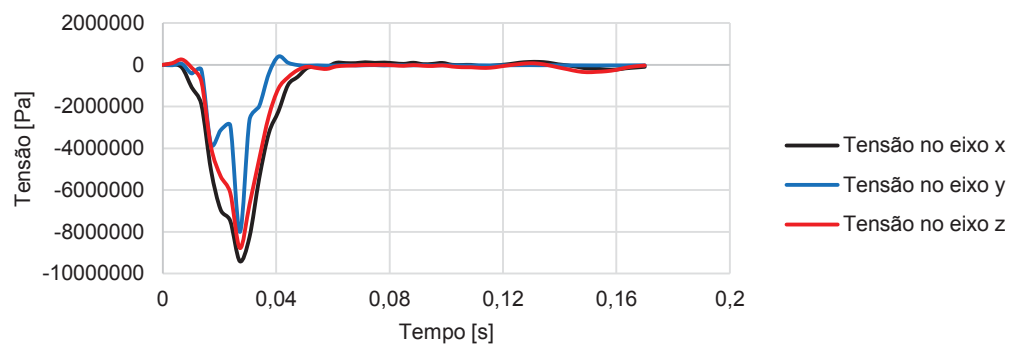
b) A340-600.



c) B747-8.



d) B777-300.

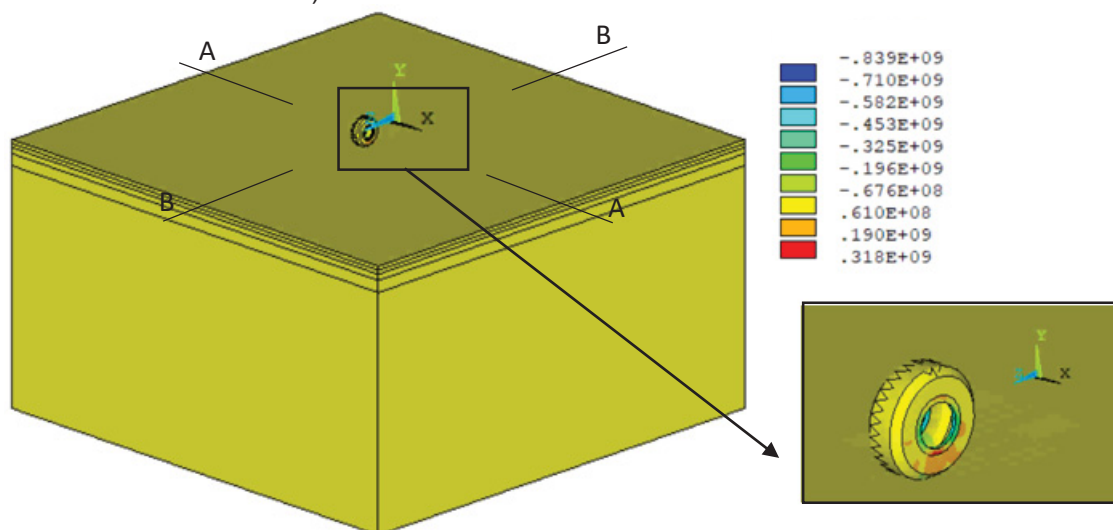


FONTE: O autor (2018).

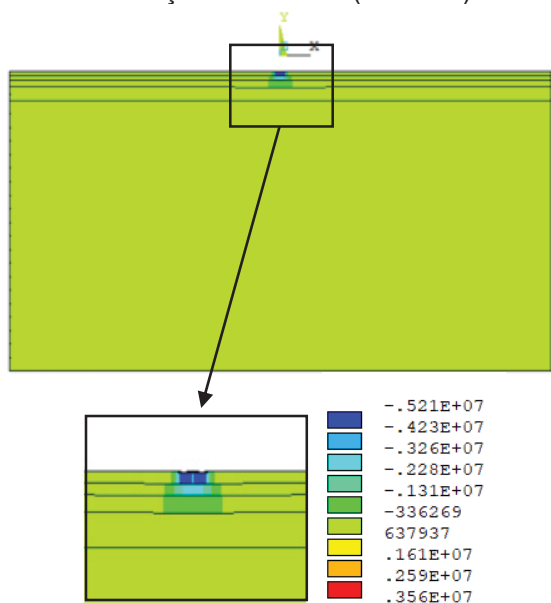


FIGURA 66 – TENSÃO  $\sigma_y$  DO A380 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM PASCAL).

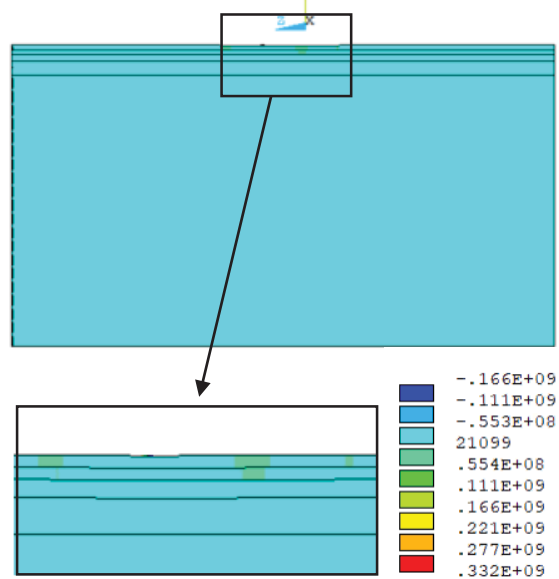
a) 3D do instante de tensão máxima vertical.



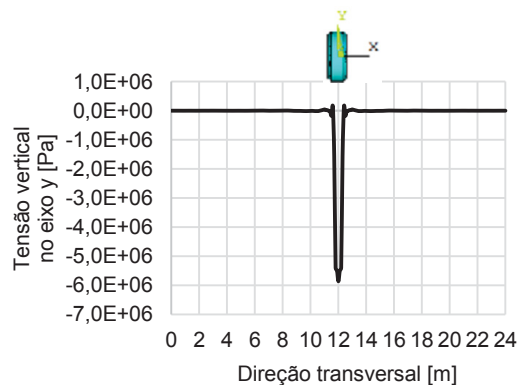
b) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção transversal (corte AA).



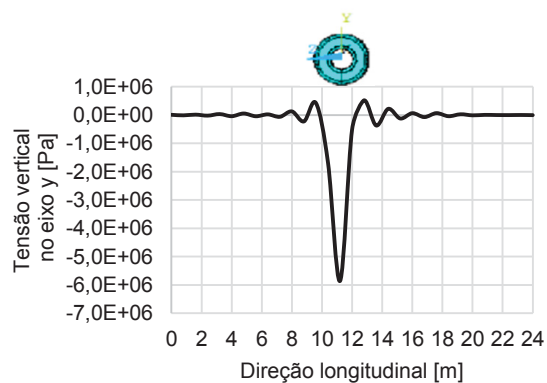
c) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção longitudinal (corte BB).



d) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção transversal.



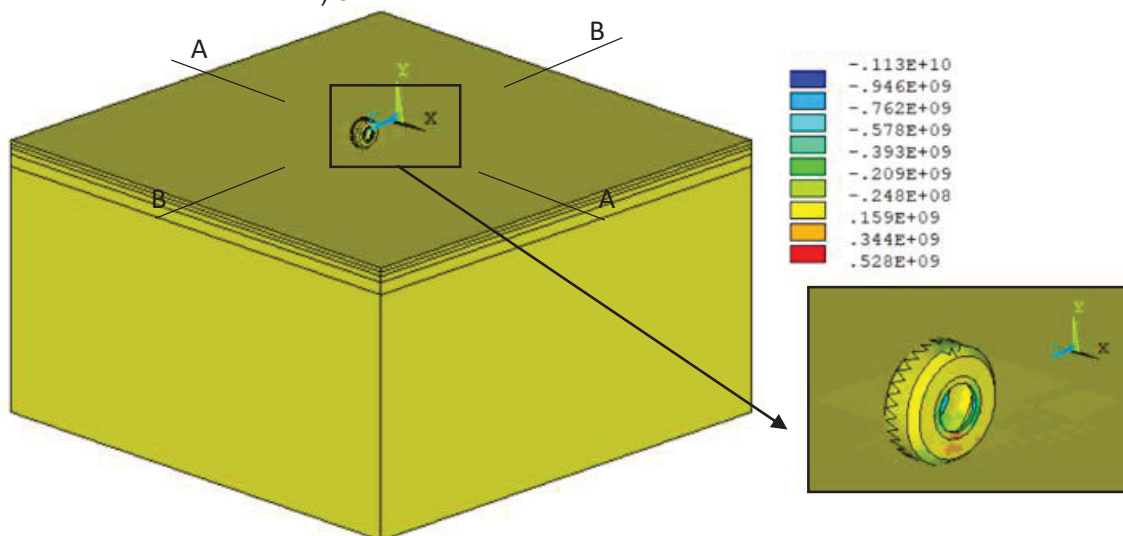
e) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção longitudinal.



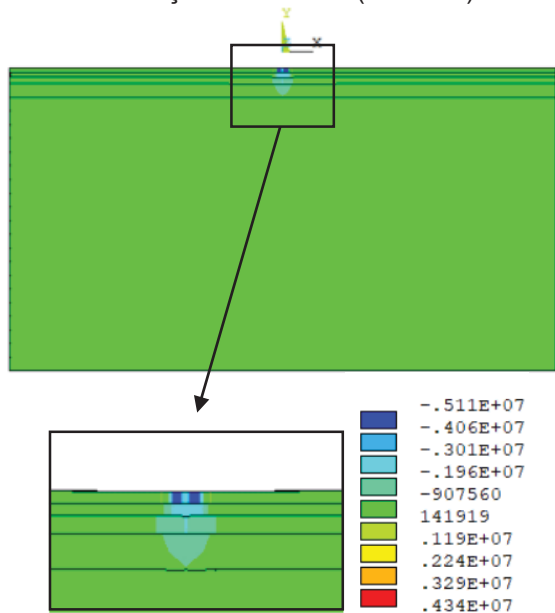
FONTE: O autor (2018).

FIGURA 67 – TENSÃO  $\sigma_y$  DO A340-600 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM PASCAL).

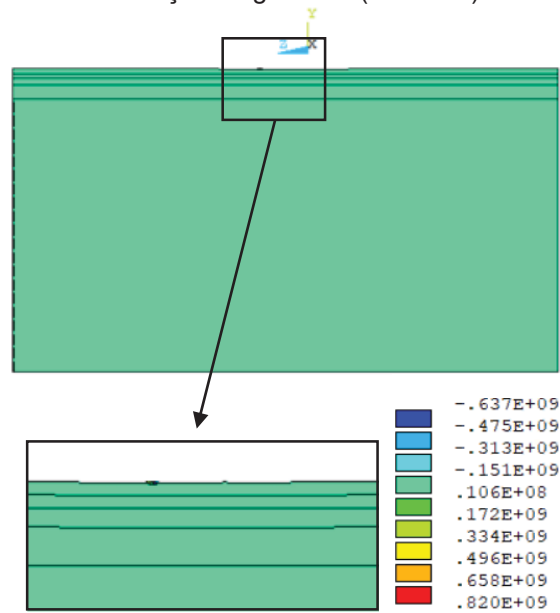
a) 3D do instante de tensão máxima vertical.



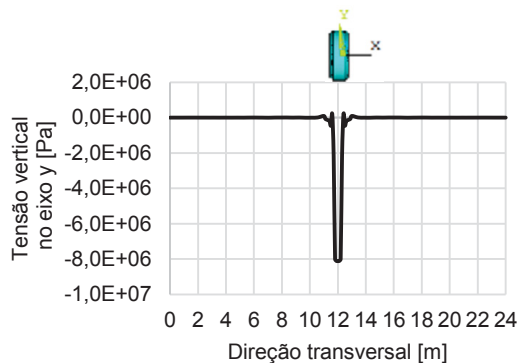
b) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção transversal (corte AA).



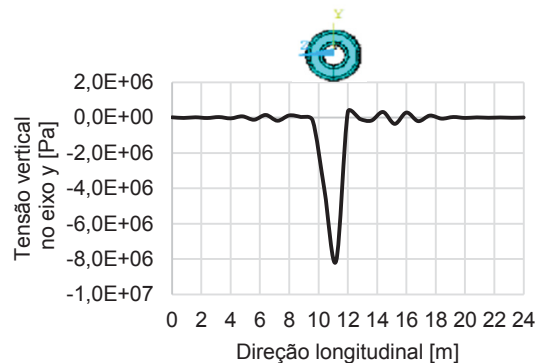
c) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção longitudinal (corte BB).



d) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção transversal.



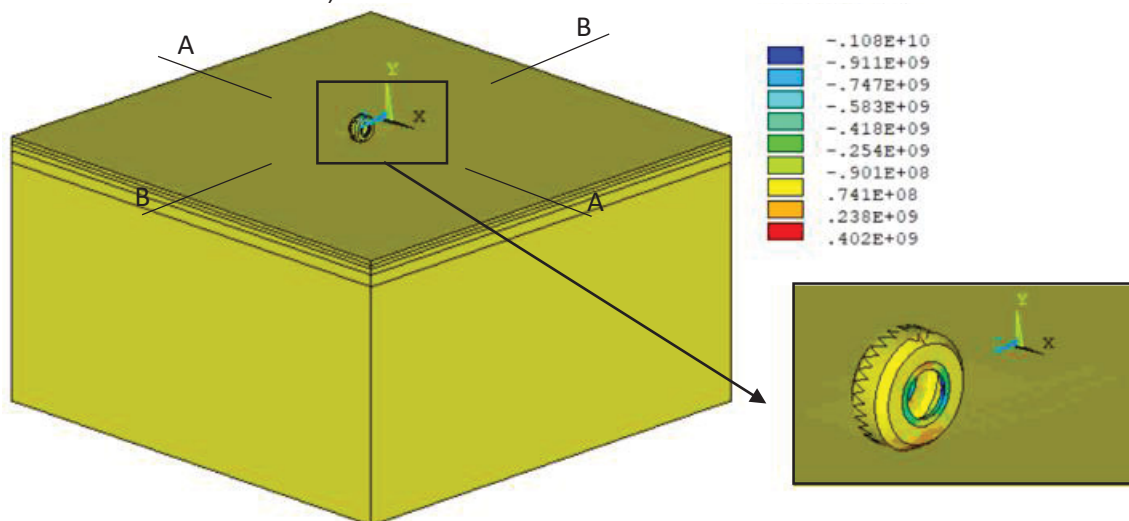
e) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção longitudinal.



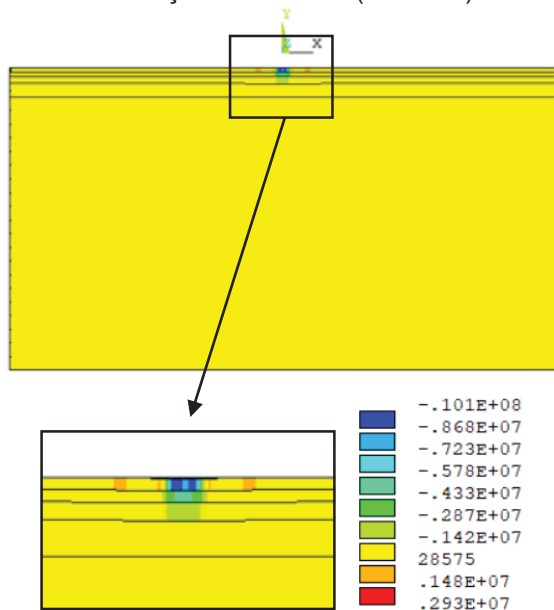
FONTE: O autor (2018).

FIGURA 68 – TENSÃO  $\sigma_y$  DO B747-8 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM PASCAL).

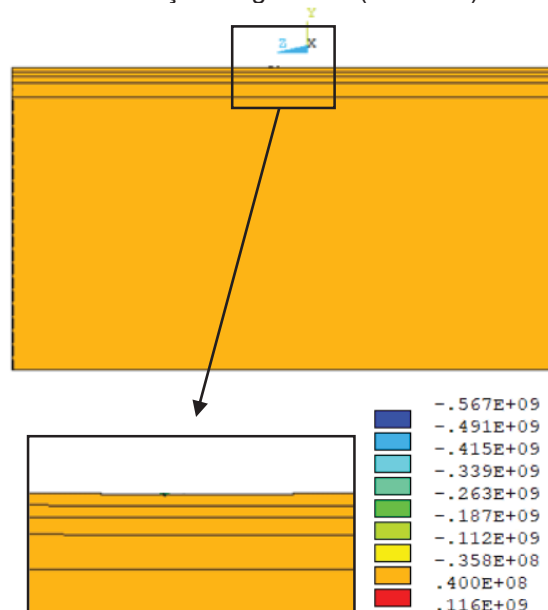
a) 3D do instante de tensão máxima vertical.



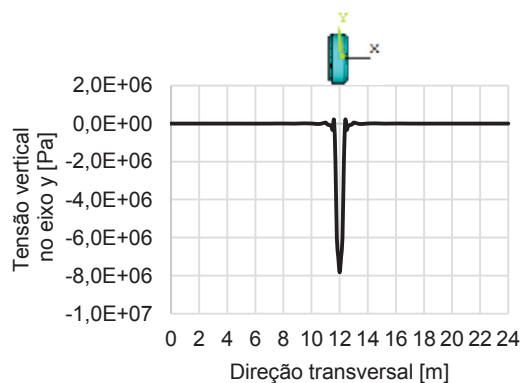
b) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção transversal (corte AA).



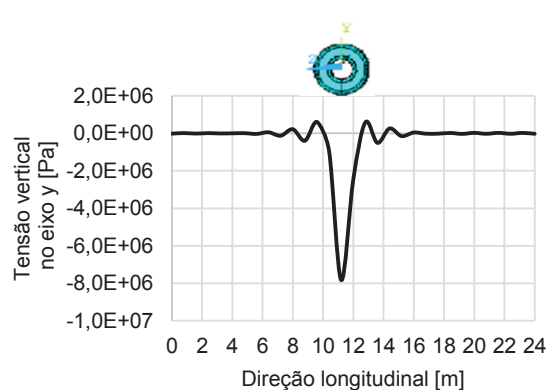
c) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção longitudinal (corte BB).



d) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção transversal.



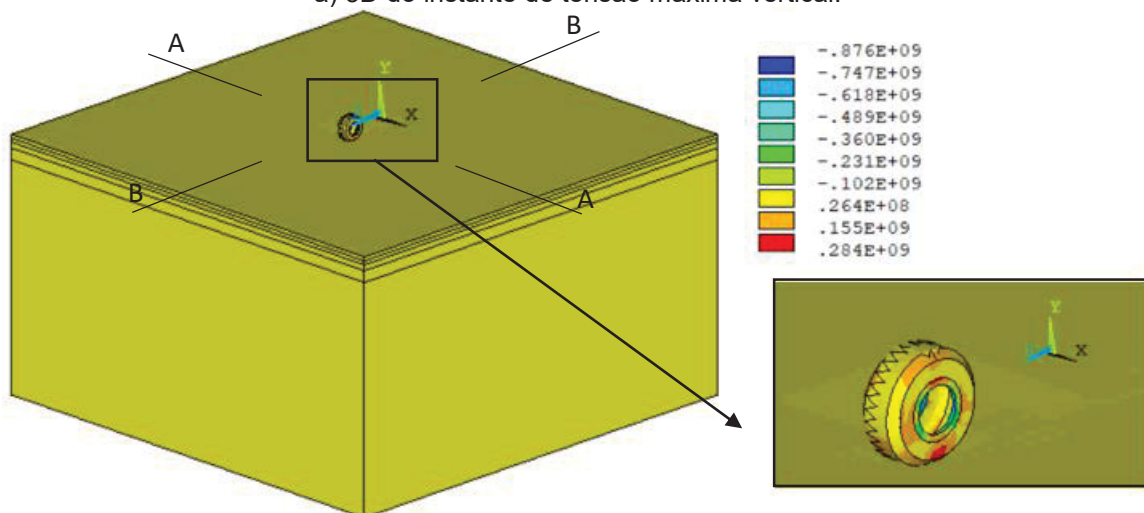
e) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção longitudinal.



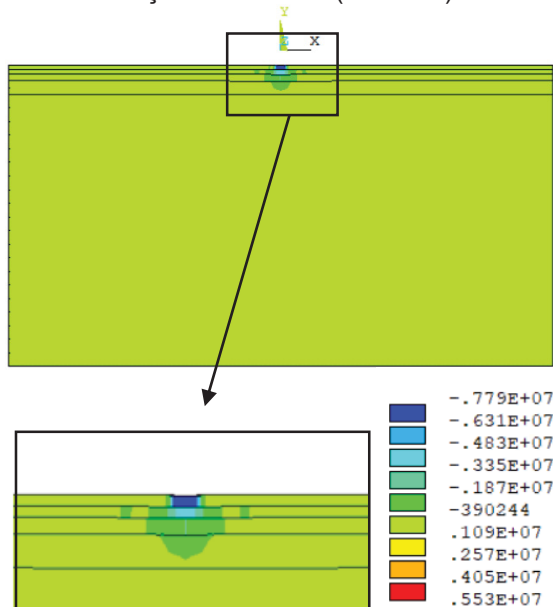
FONTE: O autor (2018).

FIGURA 69 – TENSÃO  $\sigma_y$  DO B777-300 NA ANÁLISE DINÂMICA (UNIDADE EM PASCAL).

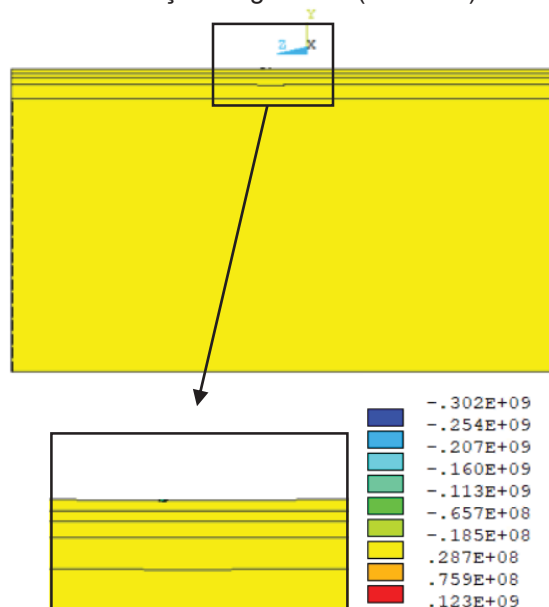
a) 3D do instante de tensão máxima vertical.



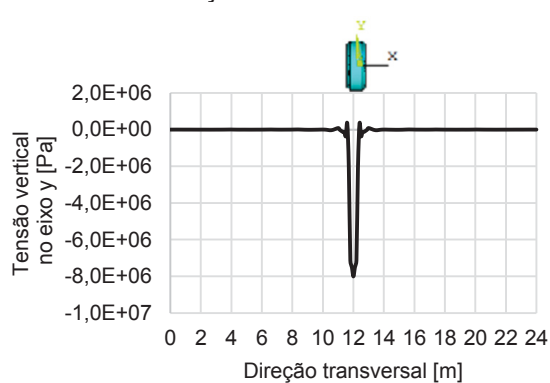
b) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção transversal (corte AA).



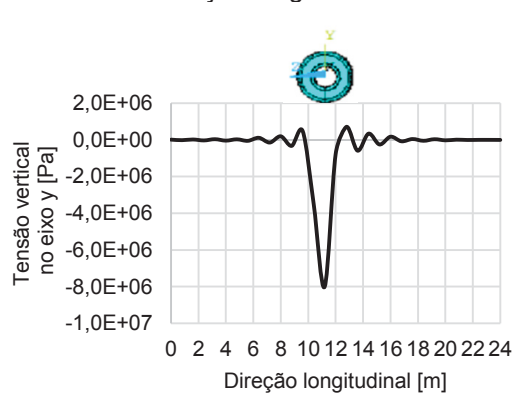
c) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção longitudinal (corte BB).



d) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção transversal.



e) Instante da tensão vertical máxima ao longo da direção longitudinal.



FONTE: O autor (2018).

A TABELA 32 apresenta os valores máximos das deformações horizontais e verticais localizados na superfície do revestimento flexível no pavimento aeroportuário, para as análises dinâmicas. Estas análises mostram que as respostas de deformações no pavimento aeroportuário também sofrem picos de tração e compressão durante o processo de pouso das aeronaves em estudo.

TABELA 32 – DEFORMAÇÕES MÁXIMAS NA SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO FLEXÍVEL NO PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO PARA AS ANÁLISES DINÂMICAS (ADIMENSIONAL).

Modelo de análise estática por aeronave	$\varepsilon_x$		$\varepsilon_y$		$\varepsilon_z$	
	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração
A380	- 0,00247	0,00044	- 0,00160	0,00153	- 0,00147	0,00081
A340-600	- 0,00364	0,00066	- 0,00239	0,00204	- 0,00215	0,00118
B747-8	- 0,00338	0,00065	- 0,00226	0,00187	- 0,00197	0,00108
B777-300	- 0,00336	0,00064	- 0,00222	0,00187	- 0,00208	0,00119

FONTE: O autor (2018).

Com os resultados da análise dinâmica, foi possível analisá-los e compará-los com os apresentados pela análise estática. Observou-se que o maior e menor deslocamentos verticais máximos de -24,90 mm e -17,99 mm foram provocados pelas aeronaves A340-600 e A380, conforme TABELA 30 e FIGURAS 60, 61 e 62. A diferença entre estes valores foi de 38,41%. As aeronaves B747-8 e B777-300 provocaram deslocamentos verticais máximos de -24,79 mm e -24,43 mm respectivamente, ou seja, valores bem próximos, com uma diferença de apenas 1,47%.

Para as análises das tensões horizontais e verticais na superfície do revestimento flexível, perceberam-se que os valores são mais complexos, uma vez que ocorre compressão e tração durante as simulações. Na compressão, as maiores tensões horizontais e vertical de -10,0 MPa, -8,9 MPa e -8,1 MPa foram provocadas pelo A340-600, conforme TABELA 31 e FIGURAS 65 e 67, no entanto, as menores tensões horizontais e vertical de -6,7 MPa, -5,8 MPa e -5,9 MPa foram provocadas pelo A380 (TABELA 31 e FIGURAS 65 e 66). Na tração, as maiores tensões horizontais e vertical de 0,9 MPa, 1,8 MPa e 0,7 MPa foram provocadas pelas

aeronaves A340-600, B747-8 e B777-300 (TABELA 31 e FIGURAS 65, 67, 68 e 69). Enquanto, as menores tensões horizontais e vertical de 0,6 MPa, 1,3 MPa e 0,5 MPa foram provocadas pelo A380 (TABELA 31 e FIGURAS 65 e 66).

Ao comparar a maior e a menor tensão horizontal máxima de compressão (TABELA 31), observou-se uma diferença entre ambas de 49,25%. E, ao comparar a maior e menor tensão vertical máxima de compressão, observou-se uma diferença de 37,29%. No entanto, ao comparar a maior e menor tensão vertical máxima de tração (TABELA 31), observou-se uma diferença de 40,0%. Para o maior e menor valor de tração da tensão horizontal máxima, essa diferença foi de 38,46%.

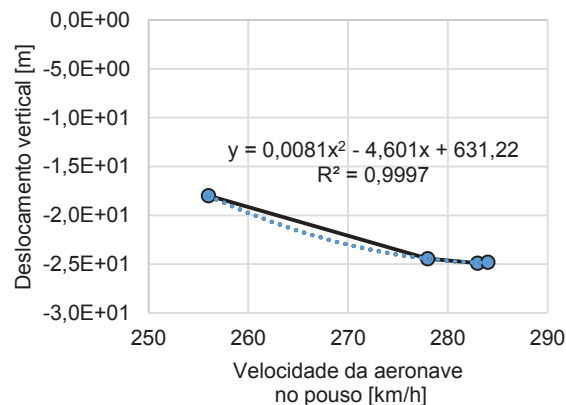
Ao comparar as respostas estáticas com as respostas dinâmicas, observaram-se que os maiores deslocamentos verticais, tensões (horizontais e verticais) e deformações (horizontais e verticais) foram apresentadas pelas simulações das análises dinâmicas. Os deslocamentos verticais apresentaram uma diferença de 13,2 a 19,5 vezes maior para as análises dinâmicas. Para as tensões horizontais e verticais os valores diminuíram e a diferença foi de 2,75 a 6,30 vezes maior que as análises estáticas. No caso das deformações horizontais e verticais, os maiores e menores valores foram apresentados pelo A340-600 e A380.

A FIGURA 70 mostra a variação do deslocamento vertical máximo da análise dinâmica com as velocidades de pouso, pressão de inflação do pneu e carga por roda do trem de pouso principal.

FIGURA 70 – VARIAÇÃO DA DEFLEXÃO (DESLOCAMENTO  $u_y^{d,máx.}$ ).

(continua)

a) Com a velocidade da aeronave durante o processo de pouso.



b) Com a pressão do pneus do trem de pouso principal.

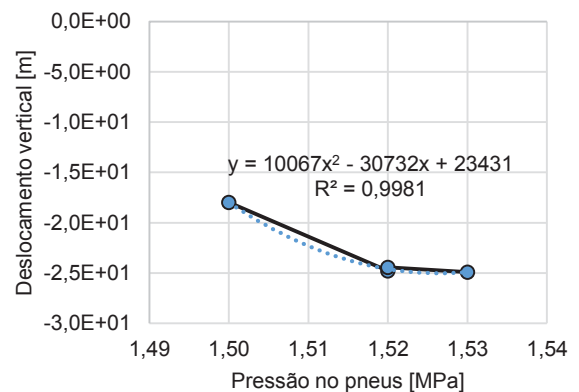
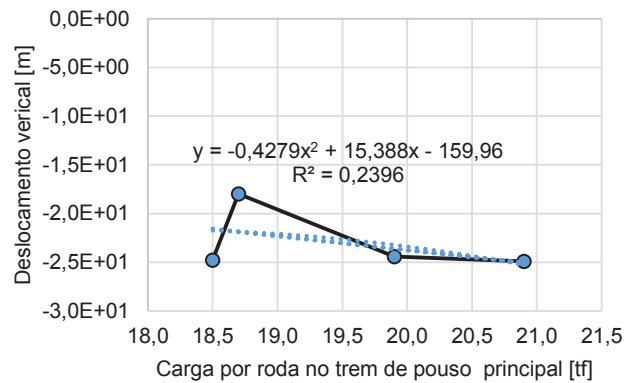


FIGURA 70 – VARIAÇÃO DA DEFLEXÃO (DESLOCAMENTO  $u_y^{d,máx.}$ )

(conclusão)

c) Com a carga por roda do trem de pouso principal.



FONTE: O autor (2018).

As linhas de tendências apresentadas nas FIGURAS 70a e 70b obtiveram resultados satisfatórios que poderão servir como base para estimar os deslocamentos verticais no pavimento aeroportuário, somente para a estrutura desta pesquisa. O fator  $R^2$  mostra, em porcentagem, o quanto a regressão se aproxima do valor ideal. Com os parâmetros de velocidade da aeronave no pouso e a pressão dos pneus do trem de pouso, os percentuais foram de 99,97% e 99,81%. A linha de tendência da FIGURA 70c, referente à carga por roda do trem de pouso principal, apresentou um fator  $R^2$  de 23,96%, ou seja, não sendo ideal para a obtenção dos deslocamentos verticais desta pesquisa.

### 5.3 COEFICIENTES DE IMPACTO

A partir deste estudo, foram calculados coeficientes de impacto conforme a metodologia apresentada por Yadav e Shukla (2012). Os coeficientes foram propostos como uma relação de deslocamento vertical máximo entre as análises dinâmica e estática, como pode ser visto na equação (27).

$$\xi = \frac{u_y^{d,máx.}}{u_y^{e,máx.}} \quad (27)$$

onde,  $\xi$ ,  $u_y^{d,máx.}$  e  $u_y^{e,máx.}$  são os respectivos coeficiente de impacto, deslocamento vertical máximo da análise dinâmica e deslocamento vertical máximo da análise

estática. A TABELA 33 apresenta os coeficientes de impacto propostos nesta pesquisa.

TABELA 33 – COEFICIENTES DE IMPACTO PROPOSTOS NESTA PESQUISA (ADIMENSIONAL).

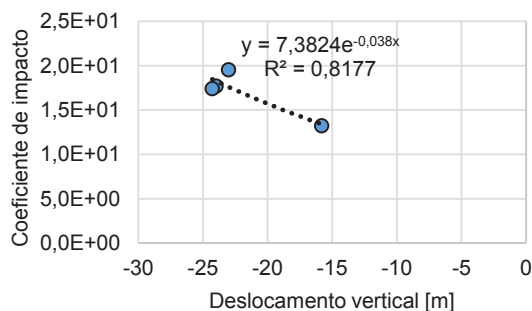
Modelo de análise por aeronave	$u_y^{e,máx.}$ [mm]	$u_y^{d,máx.}$ [mm]	$\xi$
A380	- 1,36	- 17,99	13,22
A340-600	- 1,43	- 24,90	17,41
B747-8	- 1,27	- 24,79	19,52
B777-300	- 1,38	- 24,43	17,70

FONTE: O autor (2018).

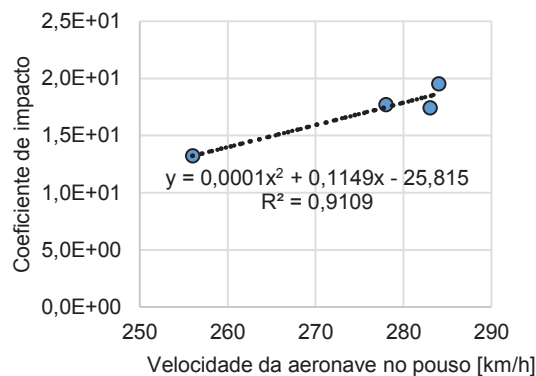
A FIGURA 71 mostra a variação do coeficiente de impacto da análise dinâmica com o deslocamento vertical, velocidades de pouso, pressão de inflação do pneu e carga por roda do trem de pouso principal.

FIGURA 71 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE IMPACTO  $\xi$  (ADIMENSIONAL).

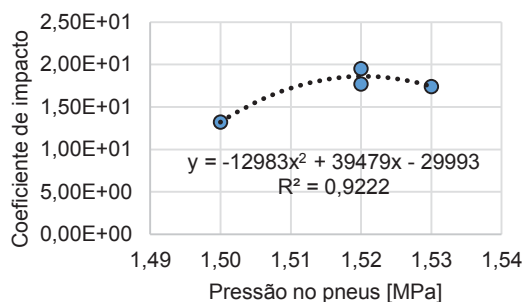
a) Com o deslocamento vertical no pavimento aeroportuário da análise dinâmica.



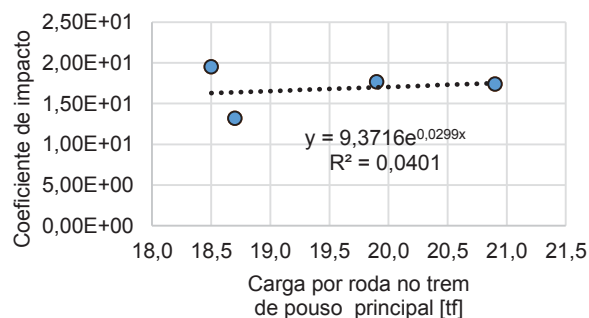
b) Com a velocidade da aeronave durante o processo de pouso.



c) Com a pressão dos pneus do trem de pouso principal.



d) Com a carga por roda do trem de pouso principal.



FONTE: O autor (2018).



As linhas de tendência apresentadas pelas FIGURAS 71a, 71b e 71c, de 81,77% a 92,22%, podem ser consideradas satisfatórias para a estrutura adotada apenas nesta pesquisa. Ou seja, poderão servir como estimativa de valores para os respectivos coeficientes de impacto, pois através destes parâmetros adotados, os resultados tendem a apresentar uma maior precisão. No entanto, a linha de tendência da FIGURA 71d apresentou 4,01%, ou seja, não sendo ideal para a obtenção de coeficientes de impacto desta pesquisa. Os resultados, no entanto, estão limitados devido à relativa simplicidade do modelo desenvolvido nesta pesquisa, que não considerou condições de amortecimento, rigidez e sustentação da aeronave, sobreposição de pneus, o que seguramente afetariam estas respostas.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões acerca da pesquisa realizada e as sugestões para trabalhos futuros, visando a contribuição para melhorar o entendimento do comportamento estrutural em pavimentos flexíveis das pistas de aeroportos sob condições de pousos das AMP. Os resultados foram comparados com os obtidos para aeronaves genéricas comuns. Foram consideradas as situações mais críticas em termos de solicitações (peso máximo de pouso), mas sem considerar no modelo as condições de rigidez da aeronave e amortecimento do trem de pouso, que requereriam a elaboração de um modelo mais complexo.

Este trabalho tratou de análises estáticas e dinâmicas do contato pneu-pavimento utilizando o MEF. Foram realizadas simulações computacionais baseadas em um modelo tridimensional elástico-linear para estudar o comportamento das tensões, deformações e deflexões máximas que ocorrem no pavimento aeroportuário, sujeito às aplicações de cargas estáticas e dinâmicas das aeronaves. Nos modelos estáticos, foram analisados o comportamento estrutural da superfície do revestimento flexível (deflexões, tensões verticais e horizontais), do topo da base (deflexões e tensões verticais e horizontais), topo da sub-base (tensões verticais e horizontais) e do topo do subleito (deflexões). Nos modelos dinâmicos, foram analisadas as respostas na superfície do revestimento flexível (deflexões, tensões e deformações verticais e horizontais) e no topo da base (tensões verticais e horizontais).

Para o modelo elástico-linear implementado nesta pesquisa, as análises mostraram que o Airbus A340-600 provoca maior deflexão, tensão e deformação ao pavimento tanto para a análise estática (ou na situação quase-estática, considerando a carga máxima de decolagem), quanto para a dinâmica (quando realiza o processo de pouso). No entanto, as aeronaves que produziram menor deflexão, tensão e deformação ao pavimento aeroportuário foram o Boeing 747-8, na análise estática, e o Airbus A380 – maior avião do mundo – para análise dinâmica.

Na comparação entre os modelos dinâmico e estático, foram observados que os resultados do modelo dinâmico amplificam as respostas. Assim, foram observadas diferenças da ordem de 17 vezes para a deflexão máxima para o A340-600 (aeronave crítica neste estudo) e de 5 vezes para a tensão máxima vertical (em compressão), ambas obtidas para a superfície do revestimento (camada mais crítica para deflexão e tensão vertical de compressão). As tensões horizontais de tração (que em princípio

ativariam mecanismos de falha) mais críticas foram observadas no fundo da base do modelo estático (no modelo dinâmico tanto o revestimento quanto a base estão comprimidas), indicando a necessidade de aprofundamento em estudos posteriores.

Os resultados apresentados foram limitados ao estudo de uma única roda do conjunto no trem de pouso principal das aeronaves contempladas no presente trabalho. Recomenda-se que, em trabalhos futuros, seja considerada a influência de ao menos uma roda vizinha adicional que venha a provocar a sobreposição dos bulbos.

Este trabalho apresenta uma proposta preliminar para a obtenção dos coeficientes de impacto. Os valores mais representativos foram obtidos pelas aeronaves Boeing 747-8 e Boeing 777-300. Estes valores, no entanto, deverão ser – conforme estudos preliminares – drasticamente afetados com a inclusão de efeitos como o amortecimento, rigidez e a sustentação das aeronaves. Recomenda-se assim, em trabalhos futuros, a implementação de modelos mais avançados que possam estudar estes efeitos. Pelo fato de não considerar adequadamente as condições de rigidez e amortecimento das aeronaves, esta pesquisa apresenta uma situação mais severa do que a situação mais realista em acordo com o processo de pouso nas pistas de aeroportos em pavimentos flexíveis.

Ainda como trabalhos futuros, há diversas sugestões que poderiam ser consideradas na modelagem, tais como: análise de pavimento rígido, utilização de novos materiais na pavimentação, novas técnicas para manutenção e diferentes comportamentos físicos, modelos com o auxílio da simetria para diminuir o esforço computacional, consideração das leis de comportamento dos materiais empregados, fadiga e estudos para a previsão de falhas.

A pesquisa mostrou que o modelo em elementos finitos tridimensional adotado nesta dissertação, apesar de suas delimitações, pode ser usado com confiança para prever a resposta do pavimento à análise dinâmica de impacto das cargas das aeronaves sobre a região de pouso da pista de aeroporto em pavimento flexível, servindo como base para trabalhos futuros nesta linha de pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ABDESSEMED, M.; KENAI, S.; BALI A. **Experimental and numerical analysis of the behavior of an airport pavement reinforced by geogrids**. Construction and Building Materials 94, p. 547–554, 2015.
- ABECHE, T. de O. **Modelagem computacional da interação dinâmica desacoplada entre viga e veículo considerando as irregularidades da via e a mecânica do dano contínuo**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC). Curitiba, 2015.
- AEDO, J. L. C. **Programa para análise tridimensional de pavimentos asfálticos**. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.
- AMADEU, M. S. U. dos S.; MENGATO, A. P. de F.; STROPARO, E. M.; ASSIS, T. T. S. de. **Manual de normalização de documentos científicos de acordo com as normas da ABNT**. Universidade Federal do Paraná Sistema de Bibliotecas. Curitiba: Editora UFPR, 2015. 327 p.
- ANSYS. **ANSYS/LS-DYNA APDL** – ANSYS Parametric Design Language. Version 12.0. 2009.
- ANSYS. **LS-DYNA Online Support**. Disponível em: <<http://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/energy-data>>. Acesso em: 07 junho 2017.
- ANSYS. **ANSYS Product Launcher Release 12.0 Help**. 2009.
- ANSYS. **ANSYS User's Manual Theory**. Swanson Analysis Systems, Inc., v. 4, 1994.
- ARAGÃO, R. F. **Acidentes de Trânsito Análise da Prova Pericial**. 6 ed., Campinas, SP: Campinas, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7187**: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ASHFORD, N. J.; MUMAYIZ, S.; WRIGHT, P. H. **Airport Engineering** – Planning, Design, and Development of 21<sup>st</sup> Century Airports. 4 ed., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- ASHFORD, N.; WRIGHT, P. **Airport Engineering**. 3 ed., New York, NY: John Wiley, 1992.

AIRBUS INDUSTRIE. **Aircraft Families**. Disponível em:<  
<http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/>>. Acesso em: 30  
 abril 2016.

AIRBUS INDUSTRIE. **Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning:**  
 A340-200/-300. Disponível em:<  
[http://www.aircraft.airbus.com/fileadmin/media\\_gallery/files/tech\\_data/AC/Airbus-  
 AC\\_A340-200-300-Dec16.pdf](http://www.aircraft.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/tech_data/AC/Airbus-AC_A340-200-300-Dec16.pdf)>. Acesso em: 17 agosto 2017.

AIRBUS INDUSTRIE. **Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning:**  
 A340-500/-600. Disponível em:<  
[http://www.aircraft.airbus.com/fileadmin/media\\_gallery/files/tech\\_data/AC/Airbus-  
 AC\\_A340-500\\_600-Dec16.pdf](http://www.aircraft.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/tech_data/AC/Airbus-AC_A340-500_600-Dec16.pdf)>. Acesso em: 17 agostos 2017.

AIRBUS INDUSTRIE. **Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning:**  
 A380. Disponível em:<  
[http://www.aircraft.airbus.com/fileadmin/media\\_gallery/files/tech\\_data/AC/AC\\_A380\\_  
 20161201.pdf](http://www.aircraft.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/tech_data/AC/AC_A380_20161201.pdf) > Acesso em: 17 agosto 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – ANAC. **Aeroportos**: Lista de  
 Aeródromos Públicos e Privados. Disponível  
 em:<<http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/aeroportos>>. Acesso em:  
 20 setembro 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – ANAC. **Anuário do Transporte Aéreo  
 2014**. Disponível em:<[http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/dados-  
 do-anuario-do-transporte-aereo](http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/dados-do-anuario-do-transporte-aereo)>. Acesso em: 02 maio 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – ANAC. **Instrução Suplementar**.  
 Disponível em:< [http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/boletim-de-  
 pessoal/2016/32/anexo-iii-is-no-153-103-001-a.pdf](http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/boletim-de-pessoal/2016/32/anexo-iii-is-no-153-103-001-a.pdf)>. Acesso em: 20 setembro 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – ANAC. **Sistema de Gerenciamento de  
 Pavimentos Aeroportuários**. Disponível em:<  
[http://www.anac.gov.br/assuntos/setor-regulado/aerodromos/publicacoes/manual-  
 para-sgpa-v3.pdf](http://www.anac.gov.br/assuntos/setor-regulado/aerodromos/publicacoes/manual-para-sgpa-v3.pdf)>. Acesso em: 20 setembro 2017.

AL-QADI, I. L.; WANG, H. **Impact of Wide-Base Tires on Pavements**: Results from  
 Instrumentation Measurements and Modelling Analysis. University of Illinois at  
 Urbana-Champaign, 2012.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo:  
 Oficina de Textos, 2007.

BARROS, A. G.; WIRASINGHE, S. C. **Designing the airport airside for the new  
 large aircraft**. Journal of Air Transport Management, p. 121-127, 2002.

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**, New Jersey: Prentice-Hall, 1996.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.  
**Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 3 ed., Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BOEING COMMERCIAL AIRPLANE GROUP. **A Família 747-8 da Boeing**. Disponível em:<  
[http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/747\\_8.pdf](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/747_8.pdf)  
 f>. Acesso em: 19 agosto 2017.

BOEING COMMERCIAL AIRPLANE GROUP. **A Família 777-300**. Disponível em:<  
[http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/777\\_23.p](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/777_23.pdf)  
 df>. Acesso em: 19 agosto 2017.

BOEING COMMERCIAL AIRPLANE GROUP. **Perspectivas de Mercado 2014-2033**. Disponível em: <[http://www.boeing.com.br/resources/po\\_BR/Featured-Content/Port-Boeing-Current-Market-Outlook\\_2014.pdf](http://www.boeing.com.br/resources/po_BR/Featured-Content/Port-Boeing-Current-Market-Outlook_2014.pdf)>. Acesso em: 30 abril 2016.

BOEING COMMERCIAL AIRPLANE GROUP. **Perspectivas de Mercado 2014-2033**. Disponível em: < <http://www.boeing.com.br/produtos-e-servicos/avioes-comerciais/perspectivas-de-mercado.page>>. Acesso em: 30 abril 2016.

BORGES, A. C. **Topografia aplicada à Engenharia Civil**. 5 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 188 p., 1999.

BRASIL. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES.  
**Infraestrutura**. Disponível em:<[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Areas\\_de\\_Atualizacao/Infraestrutura/index.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Areas_de_Atualizacao/Infraestrutura/index.html)>. Acesso em: 30 abril 2016.

BRASIL. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES.  
**Infraestrutura Aeroportuária**. Disponível em:<  
[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Apoio\\_Financeiro/Produtos/FINEM/logistica\\_infraestrutura\\_aeroportuaria.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Produtos/FINEM/logistica_infraestrutura_aeroportuaria.html)>. Acesso em: 30 abril 2016.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação**. 3.ed., Rio de Janeiro, 274 p., 2016.

BRINA, H. L. **Estradas de ferro**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1979.

BUONSANTI, M.; LEONARDI, G. **A Finite Element to Evaluate Airport Flexible Response under Impact**. Article in Applied Mechanics and Materials – Mediterranean University of Reggio Calabria. Itália, 2012.

COOK, R. D. **Finite Element Modeling for Stress Analysis**. Madison, Wisconsin (EUA): John Wiley & Sons, INC., 1995. 320 p.

CHOPRA, A. K. **Dynamic os Structures**: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995.

CORINI, F. **Scienza e tecnica delle costruzioni stradali e ferroviarie**. Milano: Editore Ulrico Hoepli, 1947.

CURREY N. S. **Aircraft Landing Gear Design**: Principles and Practices. Washington: AIAA Education Series, 1998.

DENG, L; CAI C.S. **Development of dynamic impact factor for performance evaluation of existing multi-girder concrete bridges**. Engineering Structures, v. 32, n. 1, p. 21–31, 2010.

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DA UFPR. **Transportes B – Tipos de Pavimentos**. 2009. Disponível em: < <http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/TextoComplementar.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **Manual de Pavimentação**. Ministério do Transportes, 2006.

DONOVAN, F; TUTUMLUER, E. **Analysis of NAPTF trafficking response data for pavement foundation deformation behavior**. FAA WORLDWIDE AIRPORT TECHNOLOGY TRANSFER CONFERENCE AND EXPOSITION – New Directions in Airport Technology, Atlantic City, New Jersey, USA, 2007.

DUNCAN, J. M., MONISMITH, C. L. E WILSON, E. L. **Finite Element Analysis of Pavements**. Highway Research Record 228, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 18-33, 1968.

EVANGELISTA JR, F., SILVA, E.R.A. E SOARES, J.B. **Modelagem Computacional De Pavimentos Asfálticos Integração Entre Interface Gráfica E Programas De Análise**. Departamento de Engenharia de Transportes – DET, Universidade Federal do Ceará – UFC, Brasil, 2015.

FAARFIELD. **Standard thickness design software accompanying AC 150/5320-6F Airport Pavement Design and Evaluation – Version 1.42**. Disponível em:<<http://www.airporttech.tc.faa.gov/Download/Airport-Pavement-Software-Programs/Airport-Software-Detail/ArtMID/3708/ArticleID/4/FAARFIELD-142>>. Acesso em: 27 novembro 2018.

FEDERATION AVIATION ADMINISTRATION – FAA. **Advanced Airport Pavement Design Procedures – FAARFIELD 3D Finite Element Base Design Procedure**. Disponível em:< <http://www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Pavement/Advanced-Pavement-Design/3-D-Finite-Element-Model>>. Acesso em: 8 agosto 2018.

FEDERATION AVIATION ADMINISTRATION – FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation**. Advisory Circular N°: 150/5320-6E. Washington, 2009.



FEDERATION AVIATION ADMINISTRATION – FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation**. Advisory Circular N°: 150/5320-6F. Washington, 2016.

FEDERATION AVIATION ADMINISTRATION – FAA. **Mitigating the Risks of a Runway Overrun Upon Landing**. Advisory Circular N°: 91-79A. Washington, 2014.

FEDERATION AVIATION ADMINISTRATION – FAA. **Softwares**. Disponível em: <[https://www.faa.gov/airports/engineering/design\\_software/](https://www.faa.gov/airports/engineering/design_software/)>. Acesso em: 28 junho 2018.

FEDERATION AVIATION ADMINISTRATION – FAA. **Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength PCN**. Advisory Circular N°: 150/5335-5C. Washington, 2016.

FLIGHT STATS. **Flight, Airports, Stats, Company and Recourses**. Disponível em: <<https://www.flightstats.com/v2/>>. Acesso em: 30 julho 2018.

FOLHA DE SÃO PAULO. **São Paulo: Grupo Folha, 2007** – Diário. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mundo/825357-airbus-a380-o-maior-aviao-de-passageiros-da-historia-da-aviacao.shtml>>. Acesso em: 05 abril 2016.

FRANCO, F. A. C. P. **Versão da macro de Excel Desenvolvida para o Programa FEPAVE de maio de 2004**. Divulgação Interna. Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, 2004a.

FRANCO, F. A. C. P. **Avaliação dos modelos de previsão do dano de fadiga em misturas asfálticas**. Trabalhos técnicos do 17º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, dezembro, p. 100-117, 2004b.

GHOREISHY, M. H. R. **Finite element analysis of the steel-belted radial tyre with tread pattern under contact load**. Iranian Polymer Journal, v. 15, n. 8, p. 667-674, 2006.

GIUBLIN, C. R. **Diretrizes para o planejamento de canteiros de obra de pavimentação de concreto**. Universidade Federal do Paraná, 2002.

GOODYEAR. **Global Aviation Tires**. The Goodyear Tire & Rubber Company. Akron, Ohio, 2018.

GOLDNER, L. G. **Apostila de Aeroportos**. Departamento de Engenharia Civil – Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

HALL, J. W.; SMITH, K. L.; TITUS-GLOVER L. **Guide for pavement friction**. National cooperative highway research program (NCHRP). Transportation Research Board (TRB), 2009.

HALLQUIST, J. **LS-DYNA Theoretical manual**. Livermore Software Technology Corporation – LSTC. California, EUA, 1998. 488 p.

HALLQUIST, J. **Getting Started with LS-DYNA**. Livermore Software Technology Corporation – LSTC. California, EUA, 2002. 17 p.

HORONJEFF, R., AND MCKELVEY, F. X. **Planning and design of airports**. McGraw-Hill, 4 ed., New York, 1994.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. University of Kentucky. 2. ed. Lexington, 1993.

HUGHES, T. **The Finite Element Method - Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION – ICAO. **Aerodrome Design Operations**: Anexo 14., 3 ed., 1999.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION – IATA. **February Demand Growth Stay Strong**. Disponível em: <<http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2016-04-07-01.aspx>>. Acesso em: 12 abril 2016.

KERMODE, A. C. **Mechanics of flight**. 11 ed., London: Pearson Prentice Hall, 2006.

KIM, M; TUTUMLUER, E. **Validation of a three-dimensional finite element model using airfield pavement multiple wheel load**. Road Mater Pavement Des, p. 387–408, 2010.

KRAZON, W.; MALACHOWSKI, J. **Multibody rigid models and 3D FE models in numerical analysis of transport aircraft main landing gear**. Bulletin of The Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, vol. 63, n. 3, 2015.

LEIA, L.; QIANG-KANGA, G.; ZHENG, L.; GUO-DONG, L.; AI-HONG, W. **Simulation Analysis of Aircraft Taxiing Dynamic Load on Random Road Roughness**. Procedia Engineering 12, p. 163–169, 2011.

LEONARDI, G. **Finite Element Analysis of Airfield Flexible Pavement**. Archives of Civil Engineering, 2014.

LINHARES, L.; DUARTE, J. F. **Dinâmica de Pneus**. Faculdade de Engenharia do Porto – FEUP, 2015.

LU, Y.; YANG, S.; LI, S.; CHEN, L. **Numerical and experimental investigation on stochastic dynamic load of a heavy duty vehicle**. Applied Mathematical Modelling 34, p. 2698–2710, 2010.

MAHONY, M. J. O.; UEBERSCHAEFER, A.; OWENDE, P. M. O.; WARD, S.M. **Bearing capacity of forest access roads built on peat soils**. Journal of Terramechanics, v. 37, p. 127-138, 2000.

MALLICK, R. B.; EL-KORCHI, T. **Pavement engineering: Principles and practice** CRC Press, Boca Raton, FL., 2009.

MATIUSHINA, A. A.; POGORELOVA, A. V.; KOZIN, V. M. **Effect of Impact Load on the Ice Cover During the Landing of an Airplane**. International Journal of Offshore and Polar Engineering. v. 26, n. 1, p. 6-12, 2016.

MARCHETTI, O. **Pontes de concreto armado**. São Paulo: Blucher, 2008.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.

MEDINA, J; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2 ed., Rio de Janeiro, RJ., 2005.

MEDINA, J; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3 ed., Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MENDES, P. T. de F. **Análise Dinâmica de Uma Estrutura** - Estudo Numérico e Experimental. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 2012.

MICHELIN. **Manual de Informações técnicas**. Disponível em: <  
[https://www.redemichelin.com.br/admin/news/ATTACH\\_125\\_manual\\_infotecn.pdf](https://www.redemichelin.com.br/admin/news/ATTACH_125_manual_infotecn.pdf)>.  
Acesso em: 20 junho 2018.

MODARRES, A.; SHABANI, H. **Investigating the effect of aircraft impact loading on the longitudinal top-down crack propagation parameters in asphalt runway pavement using fracture mechanics**. Engineering Fracture Mechanics 150, p. 28-46, 2015.

MOTTA, L. M. G. **Seção de pavimento flexível utilizado no Aeroporto Internacional de São Paulo em Guarulhos com as respectivas características**. Rio de Janeiro, 2018. Comunicação pessoal

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. Nasa Technical Note. **Landing Loads and Accelerations of the XB-70-1 Airplane**. Washington D.C., 1968.

OLIVEIRA, F. H. L. **Proposição de estratégias de manutenção de pavimentos aeroportuários baseadas na macrotextura e no Atrito**: estudo de caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, CE, 178p, 2009.

PEREIRA, A. M. **Análise crítica dos fatores de equivalência adotados pelo DNER e sua adequação as rodovias de tráfego pesado**. Tese (Professor titular) – Departamento Transportes, Universidade Federal do Paraná, 330 p., 1985.

POGORELOVA, A. V.; KOZIN, V. M.; MATIUSHINA, A. A. **Critical Stresses of Ice Cover as Fracture Criterion During Take-Off and Landing of an Airplane**. Proc 11th Pacific/Asia Offshore Mech Symp, Shanghai, China, ISOPE, p. 121-126, 2014.

POGORELOVA, A. V.; KOZIN, V. M.; MATIUSHINA, A. A. **Stress-strain state of ice cover during aircraft takeoff and landing**. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, v. 56, p. 920-926, 2015.

PRAVIA, Z. M. C. **Estabilidade de Estruturas de Pontes Metálicas com Fraturas**. Tese de Doutorado – COPPE/Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 135p., 2003.

RAMOS, F. R. Q. **Aplicação de SMA (Stone Matrix Asphalt) em Pavimentos Aeroportuários** – Estudo de Caso [manuscrito]: Aeroporto de Aracaju – SE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

RODRIGUES, P. P. F. **Pavimentos Estruturalmente Armados para Aeroportos**. Instituto Brasileiro de Telas Soldadas – IBTS. 1 ed., São Paulo, 2004.

ROEHRS, R. A. **Estudos de Procedimentos para Avaliação dos PCN de Pavimentos Aeroportuários**: Tese de Doutorado. ITA – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2002.

ROSS, I.; EDSON, R. **Application of Active Control Technology to the A-10 Aircraft**. National Aeronautics and Space Administration – NASA. Hampton, Virginia, 1983.

SAAD, B.; MITRI, H.; AND POOROOSHASB, H. **Three-Dimensional Dynamic Analysis of Flexible Conventional Pavement Foundation**. Journal of Transportation Engineering, ASCE, v. 131, n. 6, p. 460-469, 2005.

SÁNCHEZ, C. A. A. **Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 126 p., 2001.

SANTOS, B. J. **Projeto de Aeroportos**: Apostila e Notas de aulas da disciplina de Aeroportos, Portos e Vias Navegáveis - Universidade Estadual de Goiás. Goiás, 2014.

SCHMID, M. T. **Dimensionamento de pavimentos aeroportuários**. Curitiba, 2016. Entrevista ao autor em 14/04/2016.

SCHMID, M. T. **Pavimentos Rígidos em Concreto Protendido**. Rudloff Industrial Ltda. 2 ed., Curitiba, 2005.

SILVA, J. P. S. **Aderência Pneu-Pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-165/2008 – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 134 p. 2008.

SILVA, P. D. E. A. **Contribuição para o Aperfeiçoamento do Emprego do Programa FEPAVE2 em Estudos e Projetos de Pavimentos Flexíveis**. Dissertação de Mestrado, COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1995.

SIVAKUMAR, S.; HARAN, A. P. **Mathematical model and vibration analysis of aircraft with active landing gears**. Journal of Vibration and Control. v. 21, p. 229-245, 2015.

SIVAKUMAR, S. **Active landing gear behavior on heavy landing**. Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences. Vol. 9, p. 34-39, 2016.

STEPHEN, S.; NAIR, N. S.; JEYAN, J. V. M. L.; RUPESH, A. **Stress analysis on composite strut landing gear during rough landing**. Transactions on Innovations in Science & Technology. Vol. 2, p. 46-51, 2016.

THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION – ICCT. **EU 2020 Vehicle Targets**. Disponível em: < <http://www.theicct.org/spotlight/eu-2020-vehicle-targets> > Acesso em: 30 abril 2016.

TOLEDO, R. C. P. L. **Um estudo sobre métodos de integração direta para a análise dinâmica não-linear de estruturas**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 1983.

TORII, A. J. **Análise Dinâmica de Estruturas com o Método dos Elementos Finitos Generalizado**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2012.

WHITE, G. **Effect of aircraft traffic on the structure and response of asphalt**. Transportation Geotechnics 2, p. 56-64, 2015.

YADAV, D. K.; SHUKLA, S. K. **Analytical model for deflection of the runway pavement at touchdown point caused by an aircraft during landing**. International Journal of Geomechanics. v. 12, p. 113-118, 2012.

ZAGHLOUL, S.; WHITE, T. **Use of a three-dimensional, dynamic finite element program for analysis of flexible pavement**. Transportation Research Record, p. 60-60, 1993.

## APÊNDICE – A

### A.1 DEFINIÇÃO DAS OPÇÕES DE CONTATO

Para cada um dos três tipos de contato fornecido pelo *software*, há várias opções de contato disponíveis e que podem ser combinadas (ANSYS, 2009).

O contato geral normal (SS, NTS, STS e OSTTS) utiliza o mais simples dos algoritmos de contato, e é usado para uma ampla variedade de aplicações. A principal vantagem de utilizar esta opção é o fato de que o algoritmo de cálculo ser extremamente rápido e robusto. Contudo, a única preocupação ao trabalhar com este tipo de contato é a definição da superfície de contato. Para elementos de casca, por exemplo, deve-se definir a orientação da superfície de contato. No entanto, para elementos sólidos, esta orientação é feita de forma automática.

O contato automático (ASSC, AG, ASS2D, ANTS e ASTS) está junto com a família de contato geral, sendo uma das opções mais utilizadas. A principal diferença entre as opções de contato geral e automática é a orientação da superfície de contato para elementos de casca determinada automaticamente pelos algoritmos de contato automático.

O contato rígido (RNTR e ROTR) é similar ao contato geral, exceto por usar rigidez linear para resistir à penetração, usando uma curva de força por deflexão. Esses contatos são normalmente utilizados para dinâmicas de múltiplos corpos, onde todos os corpos são rígidos.

O contato *tied* (TDNS, TDSS e TSES) adere os nós da superfície de contato à superfície alvo após o contato. O efeito deste tipo de contato resulta em deformação nas superfícies do alvo, e os nós são forçados a seguir a mesma deformação.

O contato *tiedbreak* (TNTS e TSTS) é idêntico ao contato *tied*, exceto pelo fato de que os nós da superfície de contato são aderidos aos nós da superfície alvo, até que um critério de falha seja atingido. Este tipo de contato é geralmente usado para representar conexões soldadas em pontos ou parafusadas.

O contato *eroding* (ESS, ENTS e ESTS) é necessário quando os elementos sólidos que formam uma ou ambas as superfícies exteriores sofrem falha de material durante o contato e permite continuar a análise com os elementos internos restantes.

O contato *edge* (SE) deve ser usado quando o contato ocorre de forma ortogonal à direção normal da superfície de um elemento de casca. Esta opção de contato não exige definições de superfícies contatora e alvo.

O contato *drawbead* (DRAWBEAD) é utilizado na moldagem de metais, nas quais cuidados especiais devem ser tomados para que exista uma conformação ideal do material, restringido qualquer espaço vazio após o processo.

O contato *forming* (FNTS, FSTS e FOSS) é usado principalmente em aplicações de conformação de metal. Para esses tipos de contato, as ferramentas e os moldes são normalmente definidos como alvo, enquanto que a peça de trabalho é definida como a superfície contatora. Esta opção de contato é baseada no tipo de contato automático sendo muito robusta para esta aplicação.

Existem vários métodos, na literatura e nos programas que utilizam elementos finitos, que consideram o problema de contato entre dois sólidos. No entanto, o ANSYS LS-DYNA utiliza o Método de Penalização para garantir que não aconteça a penetração entre sólidos, ao entrar em contato. Pois, após a identificação do contato, o *software* realiza uma busca por penetração a cada passo de tempo, e no caso de um contato baseado neste método, uma força proporcional à profundidade de penetração é aplicada para resistir e finalmente eliminar a penetração. O Método de Penalização é caracterizado por impor que as condições de contato se verifiquem de forma aproximada através de um fator de penalização.

Este método é padrão, e utiliza o tamanho do segmento (comprimento) de contato e as propriedades do material para determinar a condição de contato, até porque, a relação de contato é gerada através de uma mola elástica colocada entre os corpos em colisão. No entanto, como este método depende das constantes do material e do tamanho dos segmentos, o mesmo funciona de forma eficaz quando os parâmetros de rigidez do material entre as superfícies de contato são da mesma ordem de grandeza, porém, sem uma determinada rigidez de contato esses corpos tendem a penetrar-se um no outro.



## APÊNDICE – B

### B.1 MODELO COMPUTACIONAL B

O modelo computacional B foi construído para validar a forma de aplicação das condições de contorno desta pesquisa. Essas condições são: pressão de inflação no pneu, carga e velocidade de pouso da aeronave e o contato do pneu com o pavimento.

Neste modelo, foi realizada uma análise dinâmica de comportamento elástico linear, com o objetivo de comparar os resultados apresentados no estudo de Saad, Mitri e Poorooshab (2005). Estes pesquisadores analisaram a resposta dinâmica (implícita) de estrutura de pavimento flexível rodoviário com diversos comportamentos físicos<sup>20</sup> de materiais, submetido a carga de tráfego de uma única roda, com o auxílio computacional do *software* ADINA, por meio da análise tridimensional de elementos finitos. Através destas análises dos pesquisadores, a aplicação da carga em movimento foi considerada como uma onda do tipo triangular. No modelo computacional B, foram realizadas algumas alterações, porém, mantendo as características fundamentais da modelagem de referência, como por exemplo: modelo mais completo sem simetria, o que permitiu desenvolver a geometria mais realista do pneu, implicando no aumento do número de elementos finitos da malha. A geometria do pavimento flexível e as características técnicas referentes às respectivas camadas e subleito utilizados no modelo de validação B, são apresentadas na TABELA 34 e FIGURA 72.

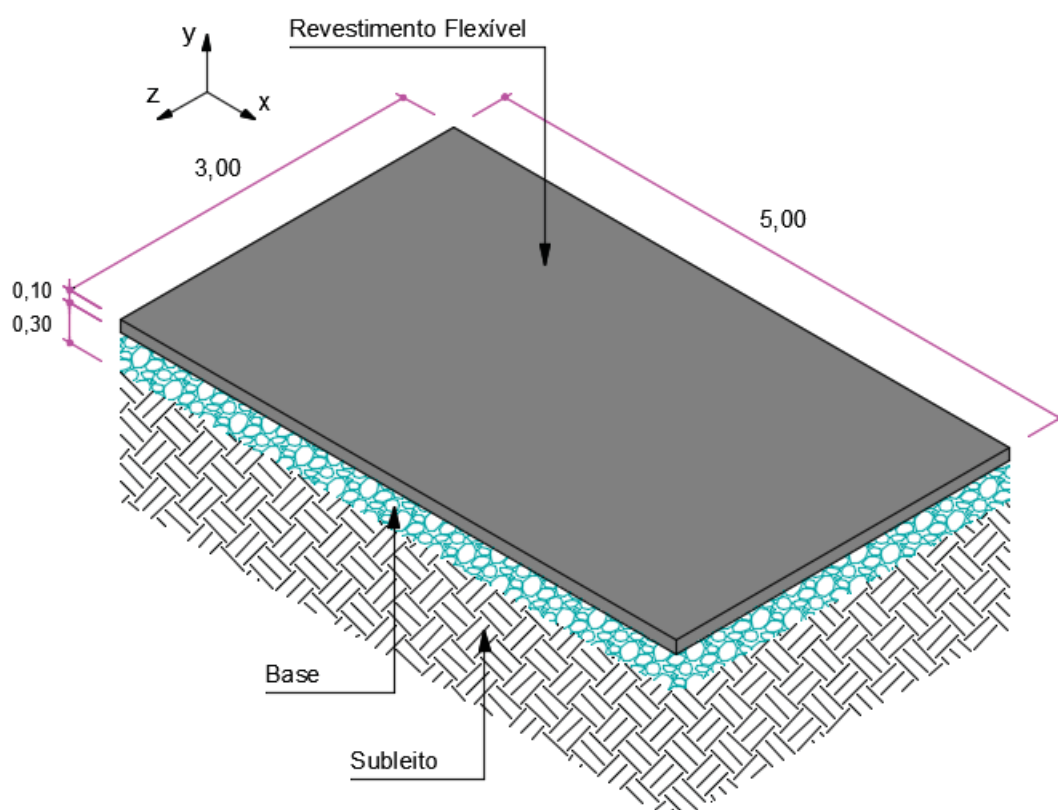
TABELA 34 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL E SUBLEITO UTILIZADOS NO MODELO DE VALIDAÇÃO B.

Camadas	$e$ [mm]	$\nu$	$E$ [Mpa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Revestimento	101,6	0,30	4134,693	2490
Base	304,8	0,30	203,734	2210
Subleito	2500,0	0,30	50,581	1380

FONTE: Adaptado do Saad, Mitri e Poorooshab (2005).

<sup>20</sup> Elástico linear (EL), elástico linear anisotrópico (ELAN), elástico perfeitamente plástico (EPP) e elastoplástico (ELPL).

FIGURA 72 – GEOMETRIA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL SEM SIMETRIA (UNIDADE EM METROS).



FONTE: Adaptado do Saad, Mitri e Poorooshasb (2005); O autor (2018).

Saad, Mitri e Poorooshasb (2005) desenvolveram um modelo com dupla simetria em que foi considerado apenas um quarto da área de contato do pneu com o pavimento, para aplicação da carga de roda. No entanto, no modelo computacional B foi desenvolvido o pneu com a geometria compatível às características técnicas do fabricante envolvendo a capacidade de carga e pressão.

O pneu utilizado para essa validação foi do tipo radial, modelo 495/45 R22,5 169J (TABELA 35 e FIGURA 73), com uma configuração de carga e pressão de inflação de 40 kN (4,0 tf) e 0,55 MPa.

TABELA 35 – CARACTERÍSTICAS DO PNEU RADIAL, MODELO 495/45 R22,5 169J.

Tipo do Pneu	Largura nominal [mm]	Diâmetro total [mm]	Diâmetro do aro [pol]	Pressão de inflação mínima e máxima [MPa]	Capacidade de carga mínima e máxima do pneu [kg]	Velocidade máxima [km/h]
Radial	495	1017	22,5	0,50 e 0,90	3652,5 e 5800	100

FONTE: Adaptado da Michelin (2018).

FIGURA 73 – PNEU RADIAL MODELO 495/45 R22.5 169J.



FONTE: Michelin (2018).

Para a modelagem do pneu é necessário entender a sua estrutura. O pneu radial é uma estrutura do tipo multicamadas (FIGURA 74), composta por materiais com diferentes comportamentos físicos (GHOREISHY, 2006; LINHARES, 2015). Nesta modelagem, utilizou-se uma configuração mais simples, composta apenas pelo talão, parede lateral e banda de rodagem (TABELA 36).

FIGURA 74 – ESTRUTURA DO PNEU RADIAL.



- 1 Revestimento de borracha interior
- 2 Carcaça
- 3 Zona baixa
- 4 Talão
- 5 Flanco ou parede lateral
- 6 Lona nylon ou aço
- 7 Lona polyester
- 8 Banda de rodagem

FONTE: Adaptado de Linhares (2015).

TABELA 36 – ESTRUTURA DO PNEU RADIAL NA MODELAGEM COMPUTACIONAL B.

Componentes da estrutura do pneu	$E$ [MPa]	$\nu$
Talão	200000	0,30
Parede lateral	3500	0,30
Banda de rodagem	3500	0,30

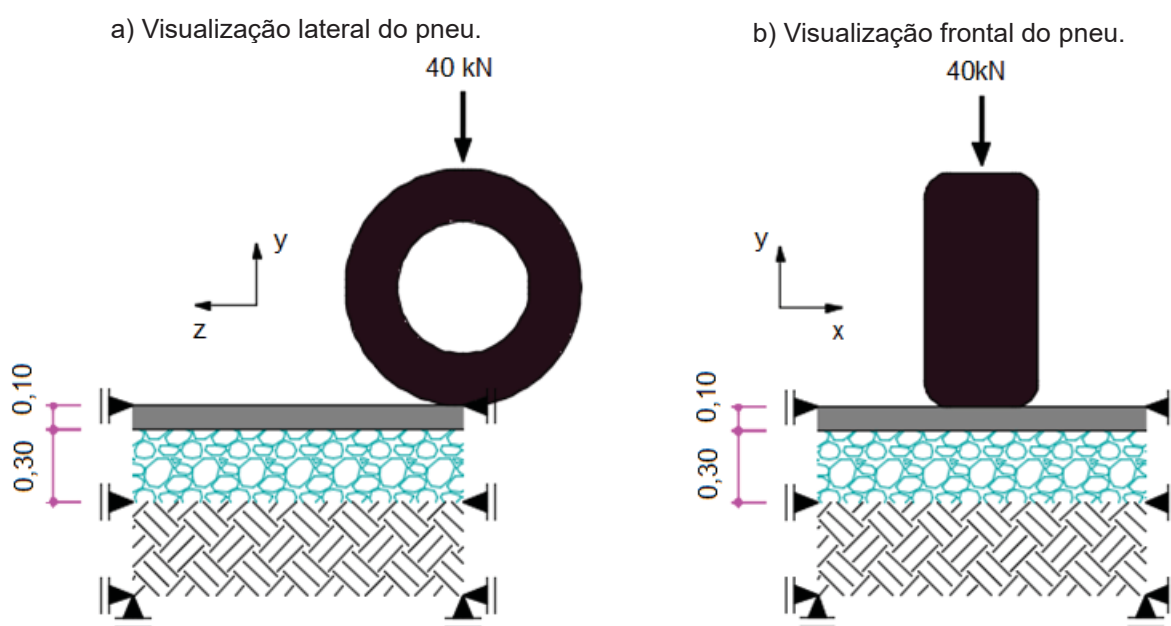
FONTE: Adaptado de Ghoreishy (2006).

Para realizar o processamento foram aplicadas as condições de contorno, como: as restrições para deslocamentos no pavimento, aplicações de velocidade, carga<sup>21</sup> e pressão de inflação. As faces paralelas das camadas do pavimento nas

<sup>21</sup> A carga foi aplicada como uma massa.

direções x e z foram restringidas para deslocamentos horizontais, e o fundo do subleito para deslocamentos verticais, como mostram as FIGURAS 75a e 75b. A simulação foi realizada para uma velocidade de 50 km/h.

FIGURA 75 – DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO DE VALIDAÇÃO B (UNIDADE EM METROS).



FONTE: O autor (2018).

Com essas condições definidas, realizou-se a discretização do domínio deste modelo de validação. Para a concepção da malha do pavimento e do pneu, foi empregado o elemento finito SOLID 164 (elemento hexaédrico de oito nós e tetraédrico de quatro nós, com três graus de liberdade cada, sendo para deslocamentos nas direções x, y e z). Com isso, foram definidas as quantidades de elementos finitos para a análise, conforme mostram a TABELA 37 e as FIGURAS 76a e 76b.

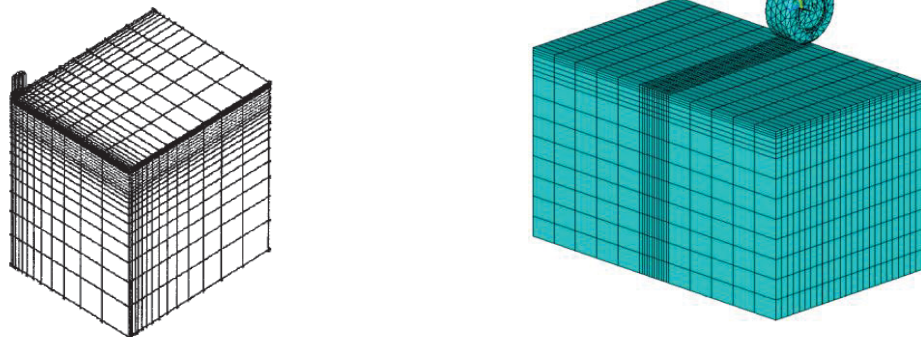
TABELA 37 – QUANTIDADE DE ELEMENTOS FINITOS POR CAMADAS DO PAVIMENTO DO MODELO B.

Modelo computacional	Quantidade de elementos finitos				Número total de elementos finitos
	Revestimento	Base	Subleito	Pneu	
Saad, Mitri e Poorooshab	720	1080	2160		3960
B	825 (x2)	1100 (x2)	2200 (x2)	1670	9920

FONTE: Adaptado do Saad, Mitri e Poorooshab (2005); O autor (2018).

FIGURA 76 – MALHA EM ELEMENTOS FINITOS.

a) Modelo computacional de Saad, Mitri e Poorooshab (2005).  
b) Modelo computacional B.



FONTE: Saad, Mitri e Poorooshab (2005); O autor (2018).

Com o pré-processamento e solução realizados, os resultados para deslocamentos verticais são apresentados na TABELA 38 e FIGURA 77.

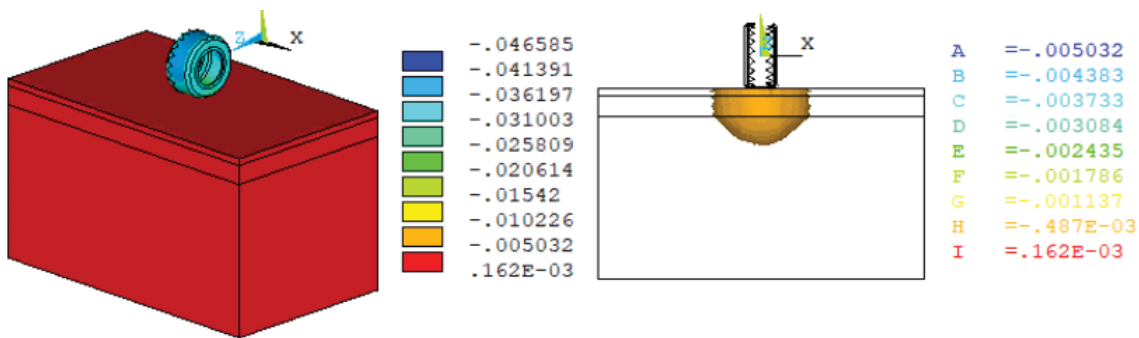
TABELA 38 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE DEFLEXÕES MÁXIMAS  $u_y^{máximo}$  DOS MODELOS COMPUTACIONAIS.

Modelo computacional	Comportamento físico das camadas				$u_y^{máximo}$ [mm]
	Revestimento	Base	Subleito	Pneu	
Saad, Mitri e Poorooshab	EL	EL	EL		- 0,202250
	EL	ELAN	EL		- 0,207847
	EL	EPP	EL		- 0,262130
	EL	EL	ELPL		- 0,222962
B	EL	EL	EL	EL	- 0,214870

FONTE: Adaptado do Saad, Mitri e Poorooshab (2005); Adaptado do ANSYS (2018).

FIGURA 77 – DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO MODELO COMPUTACIONAL B (UNIDADE EM METROS).

a) Vista 3D do ponto de deslocamento máximo.  
b) Corte transversal.



FONTE: O autor (2018).

No modelo computacional (dinâmico) B, o deslocamento vertical máximo foi de -0,42974 milímetros, para uma análise elástico linear, sem simetria. No estudo de referência, a deflexão máxima foi de -0,202250 milímetros, para uma análise elástica linear, com dupla simetria. Portanto, o deslocamento vertical máximo do modelo computacional B apresentou uma ordem de grandeza satisfatória, sendo de apenas 6,24% de diferença, comparado aos modelos computacionais apresentados por Saad, Mitri e Poorooshab.

As pequenas diferenças apresentadas devem-se ao comportamento mecânico considerado, às características de materiais do pneu, modelo de *software* utilizado e à discretização empregada na modelagem.

De acordo com os resultados apresentados no modelo computacional B, foi realizado a validação do modelo para utilização do *software* desta pesquisa. Modarres e Shabani (2015) realizaram uma validação semelhante ao modelo computacional B. Segundo estes pesquisadores, para o desenvolvimento do seu estudo investigativo, do efeito da carga de impacto de aeronaves na propagação de fissuras no pavimento aeroportuário usando a mecânica da fratura, foi realizada a validação do modelo computacional do *software* ABAQUS, através dos resultados apresentados na pesquisa de Donovan e Tutumluer (2007).

Donovan e Tutumluer (2007) analisaram os dados deflectométricos do subleito do pavimento aeroportuário da pista de testes na *National Airport Pavement Test Facility* – NAPTF<sup>22</sup> da FAA (FIGURA 78), através das medições instrumentadas com deflectômetro *Multi-Deph Deflectometer* – MDD. Os testes foram executados para o tráfego das aeronaves Boeing 777 e Boeing 747 a uma velocidade de 8 km/h. Essa velocidade representa a aeronave taxiando do ponto de embarque de passageiros até a posição de decolagem.

Nesta pesquisa, a estratégia de modelagem foi a mesma utilizada por Modarres e Shabani (2015), pois difere-se apenas nas considerações de parâmetros da análise, tais como o tipo do pavimento (rodoviário e/ou aeroportuário), propriedades dos materiais dos respectivos pavimentos, intensidade das cargas de roda do caminhão e da aeronave, geometria das aplicações destas cargas (eixo

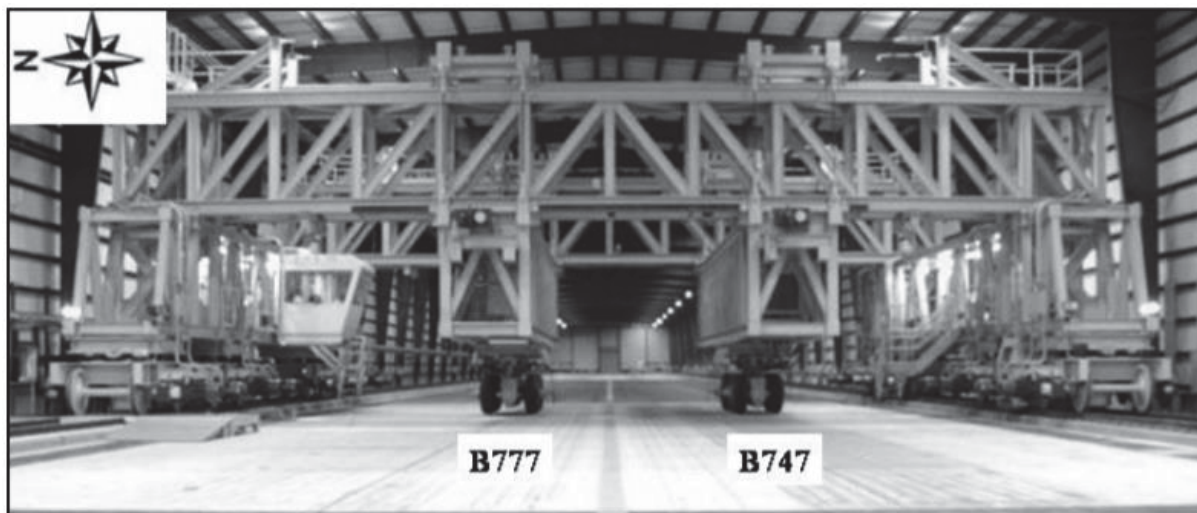
---

<sup>22</sup> O NAPTF foi construído pela FAA para realizar testes em seções de pavimentos aeroportuários, instrumentados em escala real, com a finalidade de investigar o seu desempenho estrutural, submetido às cargas provenientes dos trens de pousos mais complexos das aeronaves da nova geração como, Boeing 747-8, Boeing 777 e Airbus A380 (FAA, 2018; MODARRES; SHABANI, 2015).



padrão único no rodoviário e/ou trem de pouso no aeroportuário) e velocidades de tráfego.

FIGURA 78 – MÁQUINA DE TESTES DA NAPTF.



FONTE: FAA NAPTF<sup>23</sup> (2007 apud DONOVAN e TUTUMLUER, 2007).

<sup>23</sup> FAA NAPTF. Photo courtesy. USA, 2007.